

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Žilvinas BUČMYS

PLIENINIŲ ŠALTAI LANKSTYTŲ ELEMENTŲ VARŽTINIŲ MAZGŲ TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2012–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. dr. Alfonsas DANIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties
disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

prof. dr. Algirdas JUOZAPAITIS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, statybos inžinerija – T 002),

dr. Ieva MISIŪNAITĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos
inžinerija – T 002),

prof. dr. Ainars PAEGLITIS (Rygos technikos universitetas, Latvija, statybos
inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Hartmut PASTERNAK (Brandenburgo technologijos
universitetas, Vokietija, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos
gynimo tarybos posėdyje **2019 m. gegužės 17 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino
technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. balandžio 16 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus
Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223
Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-008-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-160-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Žilvinas Bučmys, 2019

zilvinasbucmys@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Žilvinas BUČMYS

INVESTIGATION OF BOLTED JOINTS OF COLD-FORMED STEEL ELEMENTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2019.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof. Dr Alfonsas DANIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Prof. Dr Algirdas JUOZAPAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Dr Ieva MISIŪNAITĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Ainars PAEGLITIS (Riga Technical University, Latvia, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Habil. Hartmut PASTERNAK (Brandenburg University of Technology, Germany, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 17 May 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 16 April 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertaciniame darbe analizuojamas pusiau standus mazgas, pagamintas iš mazginio lakšto ir varžtų, skirtas šaltai lankstytų plieninių elementų tarpusavio jungčiai. Toks mazgas pasirinktas dėl savo paprastumo ir didesnio paplitimo apkrovą laikančiose konstrukcijose. Pagrindinis darbo tikslas – parengti komponentų metodą plieninių šaltai lankstytų sijos ir kolonos mazgų sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti. Mazgas tiriamas kaip trijų spyruoklių – sijos ir kolonos varžtų grupių bei mazginio lakšto – visuma. Skaičiavimų rezultatai, atlikti naudojant komponentų metodą, tikrinami laboratoriniais tyrimais ir baigtinių elementų metodu.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas ir santrauka anglų kalba.

Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimo objektas. Suformuojamas darbo tikslas bei uždaviniai, pateikiama tyrimų metodika, aptariamas darbo mokslinis naujumas ir pasiektų rezultatų praktinė reikšmė, pristatomi ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos autoriaus paskelbtos mokslinės publikacijos, pranešimai konferencijose ir pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama kitų autorių mokslinės literatūros analizė tiriamu klausimu ir plieninių šaltai lankstytų elementų pusiau standžių varžtinių mazgų skaičiavimo modeliai.

Antrajame skyriuje aprašomas komponentų metodas, skirtas pusiau standaus mazgo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Pateikiamos ir pagrindžiamos kai kurių naujai siūlomų komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškos.

Trečiajame skyriuje pristatomi atlikti pusiau standaus mazgo eksperimentiniai tyrimai – laboratoriniai tyrimai ir modeliavimas baigtinių elementų metodu. Aprašoma eksperimentinių tyrimų metodika, tyrimais gauti irties pobūdžiai, lenkiamosios galios skaitinės vertės bei pateikiamos lenkiamojo momento ir pasisukimo kampo kreivės. Rezultatai palyginami visais trimis metodais – komponentų metodu, laboratoriniais tyrimais ir modeliavimo baigtinių elementų metodu.

Disertacijos tema paskelbti penki straipsniai: du – leidiniuose, įtrauktuose į *Clarivate Analytics Web of Science* sąrašą su citavimo indeksu, vienas – leidinyje, įtraukta į *Clarivate Analytics Web of Science* sąrašą be citavimo indekso, du – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose. Disertacijos tema perskaityti keturi pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose, iš kurių vienas paskelbtas *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės *Conference Proceedings* leidinyje.

Abstract

In this dissertation semi-rigid gusset plate bolted joint is analysed, which is suitable for cold-formed steel element connection. This joint is chosen because of its simplicity and common occurrence in load bearing structures. Main task of the dissertation is to apply component method for both bending moment resistance and rotational stiffness calculation. The joint is investigated as three springs – beam and column bolt groups and gusset plate. Results, which are achieved using component method, are compared with laboratory investigation and finite element modelling data.

The dissertation consists of introduction, 3 chapters, general conclusions, references and 2 annexes.

In the introduction author discusses the investigated problem, importance of the thesis and the objective of the research. Author also describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and the defended statements. At the end of the introduction author presents his publications on the subject of the defended dissertation, adding the content of the presentations from conferences.

Chapter 1 consists of the summary the relevant literature for this thesis and the review of bolted semi-rigid joints design models of cold-formed steel elements.

In Chapter 2 author discusses the application of component method for semi-rigid joint bending moment resistance and rotational stiffness calculation. This is followed by the method to calculate strength and stiffness of new components.

Chapter 3 is dedicated for the results of experimental investigation, consisting of the laboratory tests and finite element analysis. Investigation techniques are described. Bending moment resistance values, bending moment and rotation curves are presented. This is followed with the results of the calculations using component method, laboratory investigation and finite element modelling and comparing them with each other.

The work presented in this thesis has been published in five published articles: two in the *Clarivate Analytics Web of Science* database with citation index, one article – in the *Clarivate Analytics Web of Science* database without citation index, two – in international database. This has also been presented at 4 at national and international conferences, one of which referred by *Clarivate Analytics Web of Science* database *Conference Proceedings* database.

Žymėjimai

Simboliai

A_s – kerpamojo varžto skerspjūvio plotas;

E – tamprumo modulis;

F_{Rd} – varžto stipris;

F_b – varžtą veikianti apkrova;

$F_{bcf,Rd}$ – sijos ir kolonos glemžiamųjų elementų sienelių stipris;

$F_{bgp,Rd}$ – glemžiamojo mazginio lakšto stipris;

$F_{v,Rd}$ – kerpamojo varžto stipris;

I_1 – mazginio lakšto horizontaliosios iškyšos inercijos momentas;

I_2 – mazginio lakšto vertikaliosios iškyšos inercijos momentas;

I_b – sijos inercijos momentas;

L_a – atstumas nuo sijos varžtų grupės sukimosi centro iki mazginio lakšto horizontaliosios iškyšos pradžios;

L_b – atstumas nuo kolonos varžtų grupės labiausiai nuo varžtų grupės centro nutolusio varžto centro iki vertikaliosios iškyšos pradžios;

L_c – atstumas tarp labiausiai nutolusių kolonos varžtų grupės varžtų eilių;

L_d – atstumas nuo sijos varžtų grupės sukimosi centro iki kolonos varžtų grupės pirmosios vertikaliosios varžtų eilės;

M – mazgą veikiantis lenkiamasis momentas;

$M_{bbg,Rd}$ – sijos varžtų grupės laikomoji galia;

$M_{cbg,Rd}$ – kolonos varžtų grupės laikomoji galia;

$M_{gp,Rd}$ – mazginio lakšto laikomoji galia;

$M_{j,Ed}$ – skaičiuotinis mazgo lenkiamasis momentas;

$M_{j,R,bem}$ – mazgo laikomoji galia, apskaičiuota baigtinių elementų metodu;

$M_{j,R,exp}$ – mazgo laikomoji galia, apskaičiuota laboratoriniais tyrimais;

$M_{j,R,komp}$ – mazgo laikomoji galia, apskaičiuota komponentų metodu;

$M_{j,Rd}$ – skaičiuotinė mazgo laikomoji galia;

$M_{pl,Rd}$ – elemento skerspjuvio plastinė lenkiamoji galia;

M_1 – lenkiamasis momentas, veikiantis sijos varžtų grupe;

$S_{bbg,ini,bem}$ – sijos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas baigtinių elementų metodu;

$S_{bbg,ini,exp}$ – sijos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas laboratoriniais tyrimais;

$S_{bbg,ini,komp}$ – sijos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas komponentų metodu;

$S_{bbg,ini}$ – sijos varžtų grupės pradinis sukamasis standis;

$S_{cbg,ini,bem}$ – kolonos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas baigtinių elementų metodu;

$S_{cbg,ini,exp}$ – kolonos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, kuris apskaičiuotas laboratoriniais tyrimais;

$S_{cbg,ini,komp}$ – kolonos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas komponentų metodu;

$S_{cbg,ini}$ – kolonos varžtų grupės pradinis sukamasis standis;

$S_{gp,ini,bem}$ – mazginio lakšto pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas baigtinių elementų metodu;

$S_{gp,ini,exp}$ – mazginio lakšto pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas atliekant laboratorinius tyrimus;

$S_{gp,ini,komp}$ – mazginio lakšto pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas komponentų metodu;

$S_{gp,ini}$ – mazginio lakšto pradinis sukamasis standis;

$S_{j,ini,bem}$ – mazgo pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas baigtinių elementų metodu;

$S_{j,ini,exp}$ – mazgo pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas atliekant laboratorinius tyrimus;
 $S_{j,ini,komp}$ – mazgo pradinis sukamasis standis, apskaičiuotas komponentų metodu;
 $S_{j,ini}$ – pradinis mazgo sukamasis standis;
 S_j – mazgo sukamasis standis;
 W_{pl} – plastinis atsparumo momentas silpniausio mazginio lakšto pjūvio vietoje;
 V – nuo siją veikiančios apkrovos atsiradusi skersinė jėga, kuri veikia sijos varžtų grupę;
 d – varžto skersmuo;
 d_{M16} – M16 varžto vardinis skersmuo;
 e_b – atstumas nuo varžtų eilės iki laisvo plokštelės krašto apkrovos perdavimo kryptimi;
 f_u – plieno tempiamoji stiprio riba;
 f_{ub} – varžto plieno tempiamoji stiprio riba;
 k_{11} – kerpamojo varžto standžio koeficientas;
 k_{12a} – glemžiamosios plieninio šaltai lankstyto elemento sienelės standžio koeficientas;
 k_{12b} – glemžiamojo mazginio lakšto standžio koeficientas;
 k_b – vieno varžto standžio koeficientas;
 k_{b1} – pirmojoje eilėje esančio varžto standžio koeficientas;
 k_{bn} – n -tojoje eilėje esančio varžto standžio koeficientas;
 n_b – kirpimo veikiamų varžtų eilių skaičius;
 p_b – tarpai tarp varžtų eilių apkrovos perdavimo kryptimi;
 t_j – t -ojo komponento storis;
 z_{b1} – atstumas tarp pirmosios eilės varžtų;
 z_{bn} – atstumas tarp n -tosios pirmosios eilės varžtų;
 Δ_2 – poslinkis, išmatuotas antrojo poslinkių matavimo jutiklio;
 Δ_3 – poslinkis, išmatuotas trečiojo poslinkių matavimo jutiklio;
 Δ_4 – poslinkis, išmatuotas ketvirtojo poslinkių matavimo jutiklio;
 Δ_5 – poslinkis, išmatuotas penktojo poslinkių matavimo jutiklio;
 Δ_b – varžto deformacijos;
 $\Delta_{b,h}$ – horizontalioji poslinkio dėl lenkiamojo momento projekcija;
 $\Delta_{b,v}$ – vertikaliąji poslinkio dėl lenkiamojo momento projekcija;
 Δ_s – poslinkis dėl skersinės jėgos;
 γ_{M2} – dalinis koeficientas mazgų laikomajai galiai;
 σ_y – plieno stipris pagal takumo ribą;
 φ – mazgo pasisukimo kampas;

φ_1 – T formos mazginio lakšto horizontalios dalies pasisukimo kampas nuo lenkiamojo momento, kuris veikia sijos varžtų grupę;

φ_2 – T formos mazginio lakšto horizontalios dalies pasisukimo kampas nuo skersinės jėgos, kuris veikia sijos varžtų grupę;

φ_3 – T formos mazginio lakšto vertikaliosios dalies pasisukimo kampas nuo lenkiamojo momento, kuris veikia kolonos varžtų grupę;

φ_4 – stačiakampio formos mazginio lakšto horizontalios dalies pasisukimo kampas nuo lenkiamojo momento, kuris veikia sijos varžtų grupę;

φ_5 – stačiakampio formos mazginio lakšto horizontalios dalies pasisukimo kampas nuo skersinės jėgos, kuris veikia sijos varžtų grupę;

φ_{bbg} – sijos varžtų grupės pasisukimo kampas;

φ_{cbg} – kolonos varžtų grupės pasisukimo kampas;

φ_{gp} – mazginio lakšto pasisukimo kampas;

η – patikslinamasis standžio koeficientas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
1. PLIENINIŲ ŠALTAI LANKSTYTŲ ELEMENTŲ PUSIAU STANDŽIŲ MAZGŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	7
1.1. Plieninių šaltai lankstytų elementų ir jų mazgų apžvalga.....	7
1.2. Plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų klasifikavimas pagal sukamąjį standį ir laikomąją galią	15
1.3. Komponentų (mechaninis) metodas	18
1.4. Plieninių šaltai lankstytų elementų pusiau standžių varžtinių mazgų skaičiavimo modeliai	21

1.4.1. Yu ir kt. modelis	21
1.4.2. Lim ir Nethercot modelis.....	24
1.4.3. Dubina ir Ungureanu modelis.....	26
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	26
2. TEORINIAI TYRIMAI IR MODELIAVIMAS KOMPONENTŲ METODU	29
2.1. Aktyvieji sukamojo standžio ir laikomosios galios komponentai	30
2.2. Mazgo laikomosios galios skaičiavimas.....	33
2.3. Mazgo sukamojo standžio skaičiavimas.....	36
2.4. Antrojo skyriaus išvados	40
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR PALYGINIMAS SU TEORINIAIS REZULTATAIS.....	43
3.1. Pusiau standžių mazgų laboratoriniai tyrimai	43
3.1.1. Plieninių šaltai lankstytų elementų ir mazginių lakštų plieno fizinių ir mechaninių savybių tyrimas	44
3.1.2. Bandiniai ir naudojamos medžiagos.....	46
3.1.3. Laboratoriniai bandymai statine apkrova	49
3.1.4. Laboratorinių tyrimų duomenų naudojimas sijos ir kolonos varžtų grupių bei mazginio lakšto lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivėms sudaryti	50
3.1.5. Pusiau standžių varžtinių mazgų laboratorinių tyrimų rezultatai.....	53
3.2. Tiriamų mazgų modeliavimas baigtinių elementų metodu.....	61
3.2.1. Tiriamų mazgų baigtinių elementų modeliai	61
3.2.2. Bandymo baigtinių elementų metodu rezultatai	64
3.3. Komponentų metodo modelio vertinimas	70
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	78
BENDROSIOS IŠVADOS	81
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	83
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS....	93
SUMMARY IN ENGLISH.....	95
PRIEDAI ¹	111
A priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	113
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	114

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the thesis	2
The tasks of the thesis	3
The research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. REVIEW OF COLD-FORMED STEEL ELEMENT SEMI-RIGID JOINT INVESTIGATION.....	7
1.1. Review of cold-formed steel elements and joints.....	7
1.2. Classification of cold-formed steel joints according to rotational stiffness and bending moment resistance.....	15
1.3. Component (mechanical) method.....	18
1.4. Calculation models of cold-formed steel semi-rigid joints.....	21
1.4.1. Yu <i>et al.</i> model	21
1.4.2. Lim and Nethercot model	24

1.4.3. Dubina and Ungureanu model.....	26
1.5. Conclusions of the first chapter and the formulation of the objectives of the thesis	26
2. THEORETICAL INVESTIGATION AND COMPONENT METHOD	
MODELLING	29
2.1. Active components of strength and stiffness	30
2.2. Calculation of joint strength.....	33
2.3. Calculation of joint stiffness.....	36
2.4. Conclusions of the second chapter	40
3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND COMPARISON WITH THEORETICAL RESULTS	43
3.1. Laboratory investigation of semi-rigid joints	43
3.1.1. Investigation of physical and mechanical properties of cold-formed steel elements and gusset plate steel	44
3.1.2. Specimens and used material.....	46
3.1.3. Laboratory investigation by statical load.....	49
3.1.4. Application of laboratory investigation data for calculation of beam and column bolt groups and gusset plate bending moment and rotation curves	50
3.1.5. Results of semi-rigid joints laboratory investigation	53
3.2. Finite element modelling of joints under investigation	61
3.2.1. Finite element model of the joints under investigation.....	61
3.2.2. Results of semi-rigid joints under investigation using finite element method.....	64
3.3. Evaluation of component method.....	70
3.4. Conclusions of the third chapter.....	78
GENERAL CONCLUSIONS	81
REFERENCES	83
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	93
SUMMARY IN ENGLISH.....	95
ANNEXES²	111
Annex A. Declaration of academic integrity	113
Annex B. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	114

² The annexes are supplied in the attached compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Nuo praėjusio amžiaus dešimtojo dešimtmečio pradžios pastebima, kad vis didėja plieninių šaltai lankstytų konstrukcijų naudojimo mastas, nes šios konstrukcijos yra lengvos, greitai ir paprastai surenkamos, atsparios korozijai, lengvai transportuojamos. Plieniniai šaltai lankstyti elementai naudojami gyvenamuosiuose, pramoniniuose ir inžineriniuose statiniuose kaip stogo denginio ilginiai, santvarų elementai, sienų ilginiai. Taip pat jie naudojami sandėliavimo ar gyvenamųjų statinių portalinių rėmų statybai. Dažniau elementai jungiami varžtinėmis ir kniedinėmis jungtimis, rečiau virintinėmis. Šiuo metu plieniniai šaltai lankstyti elementai gali būti įvairių formų (L, U, C, Z, Sigma ir Omega), kurių sienelės storis būna nuo 0,8 iki 3,0 mm, aukštis – nuo 50 iki 350 mm. Šaltai lankstyti elementai paprastai gaminami iš plieno, kurio stipris pagal takumo ribą ne mažesnis nei 350 MPa. Jie gaminami šaltojo lankstymo būdu iš plonu antikorozinu sluoksniu (dažniau cinko) padengtų lakštų.

Kadangi šios konstrukcijos pradėtos naudoti palyginti neseniai, projektavimo metodika šių konstrukcijų elementų ir mazgų laikomajai galiai bei sukamajam standžiui skaičiuoti vis dar plėtojama. Šiuo metu Lietuvos Respublikoje galiojančiose projektavimo normose nėra pateikta metodikos, kaip įvertinti plieninių šaltai

lankstytų elementų konstrukcinių mazgų sukamąjį standį, yra pateikta tik dalis komponentų mazgo laikomajai galiai skaičiuoti.

Literatūroje pateikiama plieninių šaltai lankstytų elementų sijos ir kolonos mazgo laboratoriniai ir modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimai. Nors šių tyrimų nėra gausu ir jų trūksta, bet jie įrodo, kad šios jungtys veikia nei kaip lanksčios, nei kaip standžios, t. y. pusiau standžios. Nuo jungties sukamojo standžio priklauso lenkiamojo momento pasiskirstymas konstrukcijos sijose ir kolonose, jautrumas antrosios eilės efektams, visos konstrukcijos laikomoji galia ir stabilumas, tad būtina toliau šiuos konstrukcinius mazgus tirti ir analizuoti.

Darbo aktualumas

Konstrukcijų mazgų sukamasis standis turi įtakos visos konstrukcijos laikomajai galiai ir stabilumui. Projektuojant statinių konstrukcijas ir netinkamai įvertinus mazgo sukamąjį standį, nepakankamai tiksliai apskaičiuojamas kolonų klumpamasis ilgis, ne visai nuodugnai įvertinamas lenkiamojo momento pasiskirstymas konstrukcijoje, konstrukcijos elementų įlinkiai ir visos konstrukcijos poslinkiai. Sijos ir kolonos mazgas – vienas dažniausiai pasitaikančių ir vienas svarbiausių konstrukcijoje. Lietuvos Respublikos projektavimo normose – Statybiniame techniniame reglamente ir euronormose – nėra pateikta metodo, skirto plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamajam standžiui apskaičiuoti, todėl projektavimo praktikoje šie mazgai yra idealizuojami, nevertinant jų tikrojo sukamojo standžio. Disertacijoje pasirinktas nagrinėti varžtinis mazgas su mazginiu lakštu, nes šio tipo mazgai yra vieni labiausiai paplitusių dėl paprasto surinkimo, todėl reikalingi nauji tyrimai, siekiant ištirti plieninių šaltai lankstytų konstrukcinių mazgų elgseną ir pasiūlyti metodiką sukamajam standžiui ir laikomajai galiai įvertinti.

Tyrimų objektas

Disertacinio darbo tyrimo objektas – pusiau standžių mazgų iš plieninių šaltai lankstytų elementų ir mazginio lakšto elgsena.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – parengti komponentų metodą plieninių šaltai lankstytų sijos ir kolonos mazgų sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Apžvelgti ir analizuoti plieninių šaltai lankstytų elementų konstrukcinių mazgų sukamojo standžio ir laikomosios galios nustatymo modelius ir metodus. Nustatyti jų privalumus ir trūkumus.
2. Pateikti mazgo mechaninį modelį ir pasiūlyti metodiką kiekvieno komponento standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti.
3. Atlikus statinę apkrova veikiamų šaltai lankstytų elementų sijos ir kolonos mazgo laboratorinius tyrimus ir modeliavimą baigtinių elementų metodu nustatyti mazgo laikomąją galią, sukamąjį standį, suirimo pobūdžius.
4. Ištirti T ir stačiakampio formos mazginio lakšto elgseną, kai mazgas deformuojasi tik plokštumoje.
5. Patikrinti sukurtojo komponentų metodo tikslumą lyginant skaičiavimus komponentų metodu su laboratorinių tyrimų ir modeliavimo baigtiniais elementais rezultatais.

Tyrimų metodika

Rengiant disertaciją taikyti komponentų metodas, laboratoriniai tyrimai ir baigtinių elementų metodas. Taikant komponentų metodiką sudarytas trijų spyruoklių mechaninis modelis, kuris skirtas plieninių šaltai lankstytų konstrukcinių sijos ir kolonos mazgų, veikiamų statine apkrova, sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti. Buvo gauti aštuonių bandinių lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiai atliekant laboratorinius tyrimus ir modeliavimą baigtinių elementų metodu.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlyta sijos ir kolonos mazgą nagrinėti kaip atskirų spyruoklių visumą. Pateiktas trijų spyruoklių mechaninis modelis, skirtas plieninių šaltai lankstytų sijos ir kolonos mazgų sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti.

2. Plieninių šaltai lankstytų elementų konstrukcijų jungtims projektuoti naudojamas komponentų metodas išplėstas naujo komponento – mazginio lakšto – laikomosiomis galiomis ir sukamojo standžio matematinėmis išraiškomis. Taikant pateiktą metodą galima apskaičiuoti tiriamo sijos ir kolonos mazgo laikomąją galią ir sukamąjį standį.
3. Sijos ir kolonos mazgams pritaikyti skirtingo tipo mazginiai lakštai – T formos ir stačiakampio.
4. Pateikta metodika, kaip laboratoriniais tyrimais nustatyti ne tik viso sijos ir kolonos mazgo, bet ir atskirų jo dalių lenkiamojo momento ir pasisukimo priklausomybės grafikus, mazgą veikiant statine apkrova.
5. Pateikta metodika, kaip modeliuojant baigtinių elementų metodu sudaryti viso sijos ir kolonos mazgo bei atskirų jo dalių lenkiamojo momento ir pasisukimo priklausomybės grafikus.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Rengiant disertaciją gautas statybos inžinerijos mokslui naujas rezultatas – išplėtotas komponentų metodas, kuris skirtas plieninių šaltai lankstytų elementų sijos ir kolonos mazgo laikomajai galiiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Pasiūlytas metodas tinka inžineriniams skaičiavimams projektuojant pastato konstrukcijas. Metodika taip pat gali būti pritaikyta praplečiant projektavimo normas – eurokodus, kuriose nėra pateikta, kaip įvertinti plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamąjį standį tiek atskirų komponentų standžio ir laikomosios galios skaičiavimo matematinėmis išraiškomis, tiek pačiu trijų spyruoklių metodu. Remiantis komponentų metodo skaičiavimais, skaičiuojamojoje pastato schemoje gali būti įvertintas mazgo sukamasis standis, aprašant jį lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiu. Žinant mazgo sukamojo standžio skaičiavimo metodiką galima tiksliau įvertinti įrąžų ir poslinkių pasiskirstymą konstrukcijos elementuose.

Ginamieji teiginiai

1. Komponentų metodas gali būti taikomas plieninių šaltai lankstytų elementų konstrukcijų mazgų sukamajam standžiui ir laikomajai galiiai skaičiuoti, kuris leidžia teoriškai nustatyti jungties lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšį, naudojamą konstrukcijų elgsenai analizuoti ir konstrukcijoms projektuoti.

2. Pasiūlytas trijų spyruoklių modelis leidžia įvertinti plieninių šaltai lankstytų elementų, sujungtų varžtais ir mazginiu lakštu, mazgo sukamąjį standį ir laikomąją galią.
3. Komponentų metodas gali būti papildomas metodika, skirta mazginio lakšto sukamojo standžio ir laikomosios galios koeficientams skaičiuoti.
4. Sukurtas baigtinių elementų metodo modelis, kuris leidžia įvertinti šaltai lankstytos sijos ir kolonos mazgo bei atskirų jo dalių sukamąjį standį ir laikomąją galią.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema atspausdinti penki moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį (Bučmys *et al.* 2018; Bučmys ir Daniūnas 2015), vienas – *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės leidiniuose, neturinčiuose citavimo rodiklio (Bučmys ir Daniūnas 2017a), du kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Bučmys ir Šaučiūvenas 2013; Bučmys ir Dališanskis 2012).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 12-oji tarptautinė konferencija *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*, Vilnius, Lietuva 2016;
- 13-oji tarptautinė konferencija *The 13th Nordic Steel Construction Conference*, Tampere, Suomija, 2015;
- 7-oji tarptautinė konferencija *Eurosteel 2014: 7th European conference on steel and composite structures*, Neapolis, Italija, 2014;
- 16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2013.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados, taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis – 111 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 53 numeruotos formulės, 71 paveikslas ir 13 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 120 literatūros šaltinių.

Plieninių šaltai lankstytų elementų pusiau standžių mazgų tyrimų apžvalga

Šiame skyriuje aprašoma plieninių šaltai lankstytų elementų elgsena, pateikiama remiantis ankstesniais moksliniais tyrimais, plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų konstravimo ir elgsenos apžvalga. Taip pat pagal mokslininkų atliktus tyrimus apžvelgtas šių mazgų poveikis rėminių konstrukcijų elgsenai. Skyriaus pabaigoje aprašomi mokslininkų siūlomi metodai plieninių šaltai lankstytų elementų kerpamųjų varžtinių mazgų sukamajam standžiui skaičiuoti. Skyriaus tematika paskelbtos devynios publikacijos (Bučmys ir Dališanskis 2012; Bučmys ir Šaučiuvėnas 2013; Bučmys 2013; Bučmys *et al.* 2014; Bučmys ir Daniūnas 2015a; Bučmys ir Daniūnas 2015b, 2017a, 2017b; Bučmys *et al.* 2018).

1.1. Plieninių šaltai lankstytų elementų ir jų mazgų apžvalga

Lengvosios konstrukcijos vis dažniau naudojamos pastatų statybai. Anksčiau plieniniai šaltai lankstyti elementai dažniausiai būdavo naudojami kaip stogo arba

sienų ilginiai sienų surenkamosioms daugiasluoksniams plokštėms montuoti. Per pastaruosius 20 metų didėjo susidomėjimas šiais elementais ir daugėjo atliekamų tyrimų (Ren *et al.* 2016; Gunalan *et al.* 2015; Anbarasu 2016; Roy *et al.* 2018; Singh ir Singh 2018; Gilio *et al.* 2018; Zhang ir Young 2018; Fratomico *et al.* 2018 ir kt.) ir skaičiavimo metodų, kuriais tobulinamos skaičiavimo metodikos, jau įdiegtos į projektavimo normas ir užtikrinančios šių elementų vietinį (LST EN 1993-1-5 (2008)), iškreipiamąjį (LST EN 1993-1-3 (2008)) ir bendrąjį pastovumą (LST EN 1993-1-1 (2007)). Tai praplėtė šių konstrukcinių elementų naudojimo galimybes – jos pradėtos naudoti santvaroms ir rėminėms konstrukcijoms (1.1 pav.).

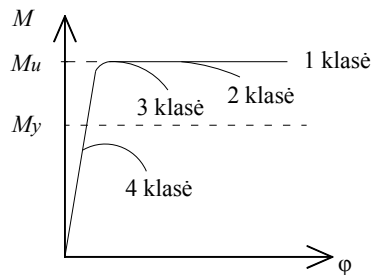


1.1 pav. Plieninių šaltai lankstytų elementų naudojimas atraminėms konstrukcijoms daugiaaukščiuose pastatuose (šaltinis: Bayan *et al.* 2011)

Fig. 1.1. Cold formed steel structure as bearing elements application for multistorey buildings (source Bayan *et al.* 2011)

Šiuo metu yra didelė įvairovė plieninių šaltai lankstytų elementų – L, U, C, Z, Sigma ir Omega formos. Paprastai šių elementų sienelės storis būna nuo 0,8 iki 3,0 mm, aukštis – nuo 50 iki 350 mm. Dažniausiai plieniniai šaltai lankstyti elementai gaminami iš plieno, kurio stipris yra didesnis pagal takumo ribą (apie 350 MPa ir didesnis). Plieniniai šaltai lankstyti elementai paprastai gaminami kambario temperatūroje iš cinku padengtų lakštų – tai apsaugo nuo korozijos. Stogų, sienų, pastatų karkaso konstrukcijos iš lengvųjų cinkuoto metalo elementų užtikrina greitą ir lengvą statybos procesą. Plieninių šaltai lankstytų elementų naudojimas turi daug privalumų (Yu 2000): nesudėtinga statyba (galima statybų aikštelėje naudoti jau gamyklose iš dalies arba visiškai surinktas konstrukcijas, kas atpigina statybą, taupo laiką ir užtikrina geresnę kokybę), statybos sparta (greitas konstrukcijų surinkimo laikas lyginant su gelžbetoninėmis monolitinėmis konstrukcijomis ar kito tipo konstrukcijomis), konstrukcijos yra stiprios ir lengvos

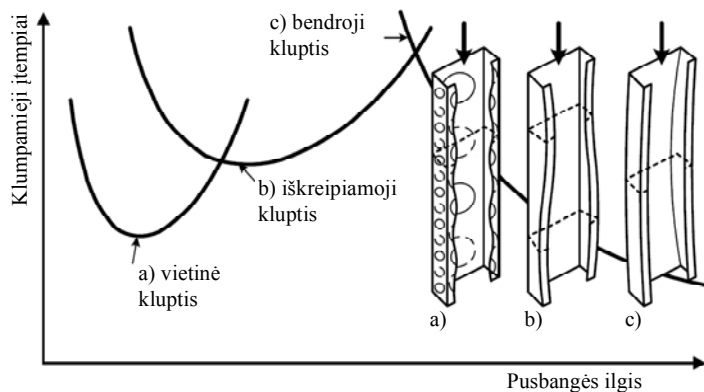
(plienas turi labai geras stiprumo savybes lyginant su svoriu, kas sutrumpina konstrukcijų surinkimo laiką statybų aikštelėje), kokybiškos (baigtos statyti konstrukcijos yra ilgalaikės ir mažai kainuoja jų priežiūra), lengvai keičiamos (ne-laikančiosios sienos gali būti keičiamos ar pašalinamos), patogus projektavimo lankstumas (dėl didelės laikomosios galios galima projektuoti didesnių tarpatrių konstrukcijas, todėl galimos didesnės erdvės), konstrukcijos yra perdirbamos (statybinės atliekos gali būti visiškai perdirbamos, kas mažina aplinkos taršą).



1.2 pav. Skerspjūvių klasifikacija pagal lenkiamąją galią (šaltinis: LST EN 1993-1-1)

Fig. 1.2. Cross section classification according to bending capacity
(source LST EN 1993-1-1)

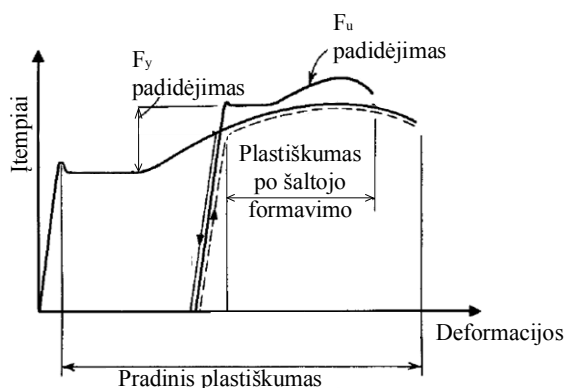
Eurokode (LST EN 1993-1-1) plieniniai elementai skirstomi į klases (1.2 pav.) pagal skerspjūvio dalies pločio ir sienelės storio santykį. Pirmos klasės skerspjūviams priklauso elementai, kuriuose gali atsiverti plastinis lankstas, o sukamoji geba neribojama. Antrai klasei priklauso elementai, kuriuose plastinis lankstas gali atsiverti, bet sukamoji geba yra ribota. Pirmai ir antrai klasei gali būti taikoma plastinė analizė. Trečiai klasei priskiriami elementai, kurių labiausiai nutolusiuose gniuždomuosiuose sluoksniuose gali atsirasti įtempių pagal takumo ribą, bet vietinė kluptis riboja plastinio lanksto atsiradimą. Ketvirtos klasės elementuose vietinė kluptis neleidžia vienoje ar keliuose skerspjūvio vietose atsirasti takumo įtempiams. Dėl šios priežasties ketvirtos klasės elementai gali būti nagrinėjami tik esant tampriajai stadijai, o geometriniais skerspjūvio rodikliais skaičiuoti taikomas efektyviojo skerspjūvio metodas. Plieniniai šaltai lankstyti elementai dėl didelio skerspjūvio dalių liaunumo paprastai būna ketvirtos klasės. Plieninių šaltai lankstytų elementų didelis skerspjūvio liaunumas turi trūkumų, kurių neturi karštai formuoti mažesnės klasės elementai. Pagrindinės klupties rūšys (1.3 pav.), labai pavojingos šiems elementams, yra tokios: vietinė kluptis (Cybulski *et al.* 2014), iškreipiamoji kluptis (Maduliat *et al.* 2015), bendroji kluptis, šoninė sukamoji kluptis kolonomis ir šoninė kluptis sijoms (Hancock 2003).



1.3 pav. Plieninių šaltai lankstytų gniuždomųjų elementų klupčių būdai (šaltinis: LST EN 1993-1-3)

Fig. 1.3. Buckling types of cold formed steel elements under compression (source LST EN 1993-1-3)

Išlankstyto elemento mechaninės savybės nedaug skiriasi nuo lakšto, kuris buvo naudotas elementui išlankstyti. Taip yra todėl, kad šaltojo formavimo procesas (Safdarian *et al.* 2015; Bidabadi *et al.* 2015) padidina stiprį pagal takumo ribą ir sumažina tąsumą. Dėl šios priežasties kluptis ir plieno patekėjimas pirmiausia prasideda tarp sąstandų. Šaltojo formavimo efektas (1.4 pav.) ties sąstandomis labiausiai pasireiškia dėl plieno stiprio pagal takumą ir stiprumą bei sąstandos užlenkimo spindulio ir lakšto storio santykio.

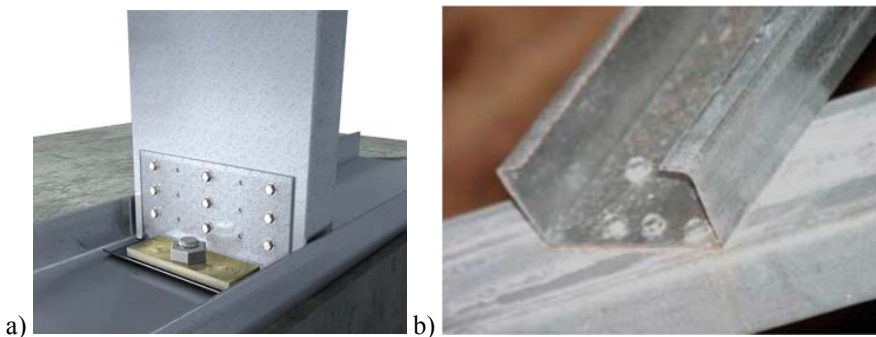


1.4 pav. Šaltojo formavimo įtaka (šaltinis: Yu 2000)

Fig. 1.4. Influence of cold formed process (source Yu 2000)

Plieninius šalta lankstytus elementus galima sujungti įvairiomis priemonėmis, tačiau dažniausiai dėl konstravimo spartumo ir paprastumo naudojami savisriegiai arba varžtai, rečiau virintinės siūlės.

Konstrukciniai elementai tarpusavyje gali būti jungiami savisriegiais (1.5 pav.) ne tik dviejų sijų ar sijos ir kolonos (Serrette ir Peyton 2009; Ye *et al.* 2016), bet ir santvaros mazgus (Dawe *et al.* 2010). Kitas pranašumas tas, kad, naudojant savisriegius, nereikia iš anksto išgręžti skylių – tai sumažina klaidų tikimybę surenkant konstrukcijas. Pirmas būdas – savisriegiais sujungiant C formos kolonos ir sijos elementus per sienelę, nenaudojant kitų konstrukcinių elementų (Lu *et al.* 2011; Tahir *et al.* 2011). Tokių mazgų laikomajai galiai turi įtakos atstumai tarp savisriegių, tačiau mazgo laikomoji galia nėra proporcinga savisriegių skaičiui jungtyje (LaBoube ir Soko 2002). Antras būdas – plieninius šalta lankstytus elementus galima prijungti prie OSB plokščių (Fiorino *et al.* 2007). Trečias būdas sujungti konstrukcinius elementus – naudojant mazginį lakštą tarp sijos ir kolonos elementų, kurie padaryti iš sudvejintų profiliuotųjų. Tokiu atveju savisriegių naudojimą riboja bendras jungiamųjų elementų sienelių storis. Rekomenduojama, kad bendras storis nebūtų didesnis kaip 3,2 mm (Mujagic ir Easterling 2009), todėl vietoje mazginio lakšto paprastai naudojamas plonasienis elementas. Ketvirtas būdas – naudoti savisriegius ir kampuočius. Chung ir Lawson (2000) laboratoriniais bandymais tyrinėjo šiuos mazgus ir nustatė, kad galimi šie trys atvejai: savisriegių kirpimas, kampuočio ir elemento sienelės, prijungtos prie kampuočio, kluptis dėl skersinės jėgos, kampuočio šoninė sukamoji kluptis. Taip pat savisriegiais galima jungti ilginius užleistiniuose mazguose. Tokius mazgus nagrinėjo Zhang ir Tong (2008). Jie nustatė, kad savisriegių skaičius mazguose neturi didelės įtakos mazgo sukamajam standžiui.

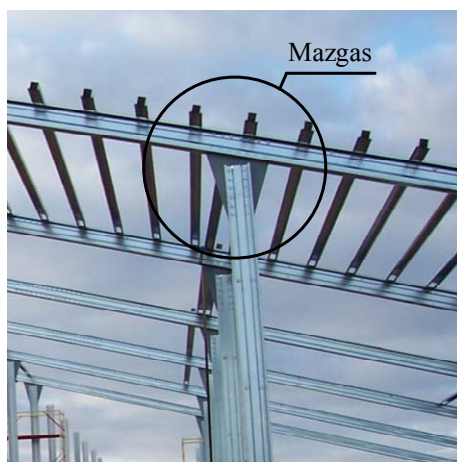


1.5 pav. Plieninių šalta lankstytų elementų mazgai, padaryti naudojant savisriegius:

a) kolonos ir pamato; sijos ir kolonos (šaltinis: <http://www.structuremag.org>)

Fig. 1.5. Cold formed steel element joint using self-drilling screws: a) column-to-foundation b) beam-to-column (source <http://www.structuremag.org>)

Taip pat plieninius šalta lankstytus elementus galima jungti virintinėmis siūlėmis. Šie mazgai gali būti laikomi standžiais (Lee *et al.* 2014; Kvedaras *et al.* 2017). Dažniausiai tokiu būdu jungiami uždarojo, apskritojo arba stačiakampio skerspjūvio elementai. Būdingas šių mazgų irties pobūdis – sienelės kluptis, nes dėl prijungto elemento sienelės susidaro įtempių samplaikos (Moazed *et al.* 2009, 2012). Zhao ir Hancock (1991, 1995a, 1995b) nustatė, kad didelę įtaką mazgo laikomajai galiai turi prijungtų dėžinių elementų skerspjūvių kampų suapvalinimo spindulys. Landolfo *et al.* (2008, 2009) atliko laboratorinius virintinių siūlių laikomosios galios bandymus ir nustatė, kad kai kuriais atvejais cinko sluoksnis gali turėti įtakos virintinių mazgų laikomajai galiai (kai kuriais atvejais laikomoji galia buvo 37 % mažesnė, palyginti su necinkuotais bandiniais). Feng ir Young (2008, 2013, 2015) pagal atliktus laboratorinius bandymus pasiūlė metodiką, skirtą mazgų su virintinėmis siūlėmis skaičiuoti. Virintinių mazgų trūkumas tas, kad pažeidžiamas cinko sluoksnis, apsaugantis konstrukcijas nuo korozijos. Tokiu atveju geriau naudoti nerūdijančiojo plieno elementų (Feng ir Young 2013, 2015).

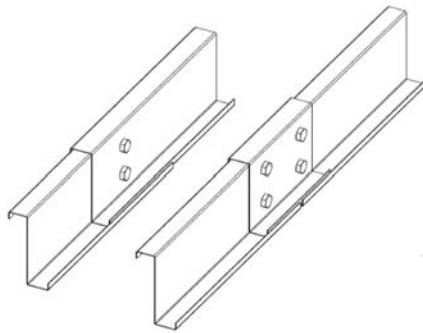


1.6 pav. Plieninių šalta lankstytų sijos ir kolonos elementų jungimas naudojant mazginius lakštus (šaltinis: <http://www.lankmeta.lt/>)

Fig. 1.6. Gusset plate connection of cold formed steel elements
(source <http://www.lankmeta.lt/>)

Vienas iš labiausiai paplitusių konstrukcinių elementų jungimo būdų yra varžtinis (1.6 pav.). Varžtai įprastai naudojami kartu su mazginiais lakštais, kampuočiais ir kitomis papildomomis jungimo detalėmis arba be papildomų detalių, pavyzdžiui, moviniuose arba užleistiniuose mazguose. Varžtiniuose mazguose dėl nedidelio glemžiamojo ploto dažniausiai pasitaikantis irties atvejis yra jungiamųjų elementų glemžimas (Kim *et al.* 2007, 2008, 2009).

Dažnai varžtai naudojami sujungiant ilginius su užleistiniais mazgais (1.7 pav.). Tai tokie mazgai, kai ilginiai užleidžiami vienas ant kito darant tam tikro ilgio užlaidą. Šio tipo mazgai nesunkiai montuojami, o dažniausiai naudojami Z formos elementai. Chung *et al.* (2004, 2005a, 2005b, 2006a, 2006b) savo laboratorinius bei modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimus atliko naudodami šoninius įtvirčius ir nagrinėdami konstrukcijos elgseną plokštumoje. Autoriai nustatė, kad tokio tipo mazgų sukamasis standis ir laikomoji galia labiausiai priklauso nuo užlaidos ilgio ir skerspjūvio aukščio, užlaidos ilgio ir tarpatramio ilgio santykio. Lenkiamoji galia padidėjo nuo 80 % iki 140 %, kai užlaidos ilgis buvo padidintas nuo 1,2 iki 6 skerspjūvio aukščių ilgio. Tyrėjų nagrinėtais atvejais irties pobūdis – tai elemento kluptis pjūvyje, kur baigiasi užlaida. Šį irties pobūdį patvirtino tolimesni Pham *et al.* (2014) tyrimai. Neto *et al.* (2016) pasiūlė metodiką skaičiuoti šių įlinkius, kuriuose būtų užleistiniai mazgai. Šių mazgų tyrimai rodo, kad šie mazgai yra pusiau standūs (Liu *et al.* 2015).



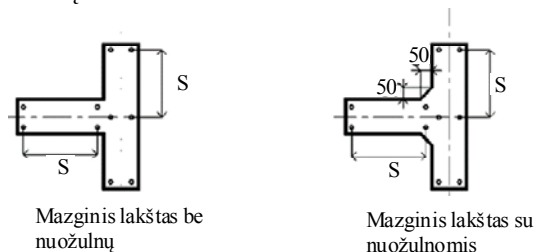
1.7 pav. Ilginių užleistinis ir movinis mazgai
Fig. 1.7. Overlapped and sleeve connections of purlins

Kitas būdas sujungti ilginius – naudoti movinius mazgus. Tai tokie mazgai, kai ilginiai sujungiami papildomu elementu. Laboratoriniais ir modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimais (Gutierrez *et al.* 2011; Yang ir Liu 2012) nustatyta, kad dažniausiai pasitaikantis irties pobūdis – elemento sienelės vietinė kluptis ties varžtų eile, labiausiai nutolusia nuo mazgo vidurio.

Tipiniai irties atvejai moviniuose arba sudurtiniuose mazguose yra šie: vietinis pastovumo netekimas elemento sienelėje ties varžtų eile susilpninto skerspjūvio vietoje, vietinis pastovumo netekimas gniuždomoje elemento lentynoje, elemento sienelės glemžimas ir varžtų kirpimas.

Varžtinį mazgą galima sukonstruoti naudojant mazginį lakštą (Bučmys ir Šaučiuvėnas 2013) arba vietoje jo – plieninį šaltai lankstytą elementą (Ozturk ir

Pul 2015) tarp dviejų dažniausiai C formos elementų. Sijos ir sijos tipo elementams tokie mazgai paprastai naudojami stogo kraigui konstruoti. Tokių mazgų laboratorinius ir modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimus atliko Lim ir Nethercot (2003, 2004), Elkersh (2010), Pernes ir Nagy (2012). Tyrėjai atliko vieno tarpatramio bandymus, bandinius suvaržant iš plokštumos šoniniais įtvirtiniais, kad bandiniai neišklyptų iš plokštumos. Tyrimai parodė, kad daugiausia bandinių suiro per elementus, o sukamasis standis labiausiai priklauso nuo atstumų tarp varžtų ir varžtų skaičiaus.



1.8 pav. Mazginis lakštas be nuožulnų ir su nuožulnomis
(šaltinis: Wong ir Chung 2002)

Fig. 1.8. Gusset plate without chamfers and with chamfers
(source Wong ir Chung 2002)

Kolonoms ir sijoms jungti plačiai naudojami varžtiniai mazgai. Plieniniams šaltai lankstytiems elementams jungti taikomas taip pat plačiai paplitęs tokių mazgų formavimo būdas – mazginių lakštų naudojimas. Šių mazgų laboratorinius tyrimus atliko Wong ir Chung (2002), tyrimus tęsė Yu *et al.* (2005). Bandiniai skyrėsi atstumu tarp varžtų eilių, mazginio lakšto storiu ir mazginio lakšto forma. Bandymų rezultatai parodė, kad mazgas iš 10 mm storio mazginio lakšto ir 50 mm nuožulnų (1.8 pav.) (angl. *chamfer*) yra tokio pat sukamojo standžio kaip ir jungtis su 16 mm storio mazginiu lakštu, bet be nuožulnų. Tyrimai taip pat parodė, kad, didėjant atstumui tarp varžtų, didėja mazgo sukamasis standis. Nuožulnų įtaką patvirtino tolimesni ir Chung ir Lau (1999) tyrimai. Kitų autorių Sabbagh *et al.* (2011, 2012a, 2012b, 2013) laboratoriniai ir modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimai parodė, kad šie mazgai yra pusiau standūs. Šiems mazgams būdingi toks irties pobūdis: vietinė klyptis prijungtuose elementuose, glemžiamos elementų sienelės, mazginio lakšto lenkimas.

Taip pat kampuočiai gali būti naudojami varžtiniais mazgams (Tan *et al.* 2013). Tokių mazgų laboratorinius bandymus atliko Hazlan ir Mahen (2010). Laboratorinių tyrimų rezultatai parodė, kad mazgo laikomoji galia buvo 70–100 % prijungtų elementų laikomosios galios, tad pasiūlyta šiuos mazgus priskirti prie dalinio stiprumo mazgų.

Vienas iš paprastesnių būdų – jungiant per elementų sienelės. Šis jungimo būdas būdingas sijos ir kolonos mazgams (Uang *et al.* 2010) ir santvarų mazgams (Zaharia and Dubina 2006). Toks mazgų montavimas nebrangus, nes nereikalingi papildomi montavimo elementai.

Apžvelgtų straipsnių analizė rodo, kad plieniniai šaltai lankstyti elementai plačiai naudojami lengvųjų plieninių rėmų statybai. Yra didelė dviejų sijų ir sijos bei kolonos mazgų įvairovė. Šių mazgų sukamojo standžio ir laikomosios galios pakanka, kad mazgai galėtų būti naudojami rėminėse konstrukcijose. Vieni dažniausiai naudojamų plieninių šaltai lankstytų elementų sijos ir kolonos mazgų dėl savo paprastumo ir greito surinkimo yra varžtiniai mazgai su mazginiais lakštais. Šių mazgų tyrimai patvirtina, kad jie yra pusiau standūs (Dubina ir Ungureanu 2010; Dubina 2008), tad jų tolimesni tyrimai būtini, siekiant išsiaiškinti jų elgseną.

1.2. Plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų klasifikavimas pagal sukamąjį standį ir laikomąją galią

Statinių konstrukcijos dažnai projektuojamos remiantis idealizuota mazgų elgsena – konstruojant lankstinius arba standžius mazgus. Tokiu būdu projektuoti konstrukcijas tampa paprasčiau, bet tai neperteikia tikrosios konstrukcijos elgsenos. Laboratoriniai tyrimai (Goverdan 1983; Nethercot 1985; Chen ir Kishi 1986; Weinand 1992) rodo, kad mazgai, apibrėžiami kaip lankstiniai, perima dalį lenkiamojo momento, o standžiuose mazguose pastebėtas pasisukimas. Mazgų elgsena turi didelę įtaką visos rėminės konstrukcijos poveikiui – lenkiamojo momento pasiskirstymui sijose ir kolonose, poslinkių dydžiams konstrukcijoje, jautrumą antrosios eilės efektams. Dėl šios priežasties, analizuojant rėminių konstrukcijų elgseną, reikia įvertinti tikrąjį mazgų sukamąjį standį. Įvertinus tikrąją mazgų elgseną galima ekonomiškiau projektuoti konstrukcijas (Anderson *et al.* 1995; Faella *et al.* 1996b, 1997).

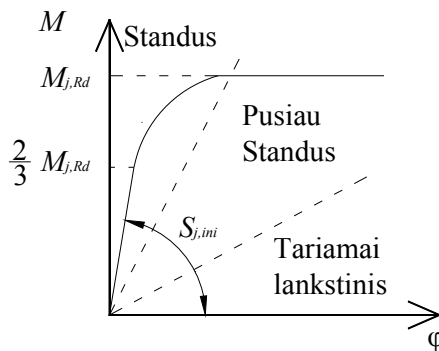
Remiantis LST EN 1993-1-8 (2007), plieninių konstrukcijų mazgai pagal laikomąją galią gali būti skirstomi į viso stiprumo, dalinio stiprumo ir tariamai lankstinius (1.1 lentelė). Viso stiprumo mazgų laikomoji galia turi būti didesnė už prijungtų elementų laikomąją galią. Tokiu atveju plastinis lankstas atsiras prijungtame elemente, bet ne mazge (Faella *et al.* 2000). Kadangi plieniniai šaltai lankstyti elementai yra plonasieniai ir atitinka ketvirtą klasę, esant plastinei stadijai jų negalima projektuoti, galima tai daryti tik esant tampriajai stadijai (Bayan *et al.* 2011).

1.1 lentelė. Mazgų klasifikavimas pagal laikomąją galią ir sukamąjį standį (šaltinis: LST EN 1993-1-8)

Table 1.1. Clasification of joints according to bearing resistance and rotational stiffness (source LST EN 1993-1-8)

Pagal laikomąją galią		Pagal sukamąjį standį	
Mazgas	Sąlyga	Mazgas	Sąlyga
Viso stiprumo	$M_{j,Rd} \geq M_{pl,Rd}$	Standus	$S_{j,ini} \geq \frac{k_b E I_b}{L_b}$
Dalinio stiprumo	$0,25 M_{pl,Rd} \leq M_{j,Rd} \leq M_{pl,Rd}$	Pusiau standus	$\frac{0,5 E I_b}{L_b} \leq S_{j,ini} \leq \frac{k_b E I_b}{L_b}$
Tariamai lankstinis	$M_{j,Rd} \leq 0,25 M_{pl,Rd}$	Tariamai lankstinis	$S_{j,ini} \leq \frac{0,5 E I_b}{L_b}$

Pagal sukamąjį standį (LST EN 1993-1-8) mazgai skirstomi į standžius, pusiau standžius ir tariamai lankstinius (1.9 pav.). Tariamai lankstiniai mazgai perima ir perduoda tik skersinę ir ašinę jėgas nuo sijos į koloną. Taip pat jie turi sukstis nesukeldami papildomo lenkiamojo momento ir neperduodami jo kolonai, nes tai turėtų įtakos kolonos laikomajai galiai. Standūs mazgai perima ir perduoda visas įrašas nuo sijos kolonai. Taip pat jų pasisukimas yra nežymus ir neturi įtakos lenkiamojo momento persiskirstymui rėminėje konstrukcijoje. Pusiau standūs mazgai perduoda tam tikrą lenkiamojo momento dalį (1.10 pav.) iš sijos kolonai ir yra aprašomi M/φ kreive (Silva *et al.* 2016; Jaspert ir Klaus 2016; Daniūnas ir Urbonas 2008, 2010; Urbonas 2006).



1.9 pav. Mazgų skirstymas pagal pradinį sukamąjį standį (šaltinis: LST EN 1993-1-8)

Fig. 1.9. Joint classification according to initial rotational stiffness (source LST EN 1993-1-8)

Projektavimo normose LST EN 1993-1-8 (2007) mazgai klasifikuojami atsižvelgiant į visos konstrukcijos schemą – rėmas su ramsčiais ar be jų. Pagal šią klasifikaciją mazgų sukamasis standis lyginamas su sijos sukamuoju standžiu.

Mazgas standus, jei:

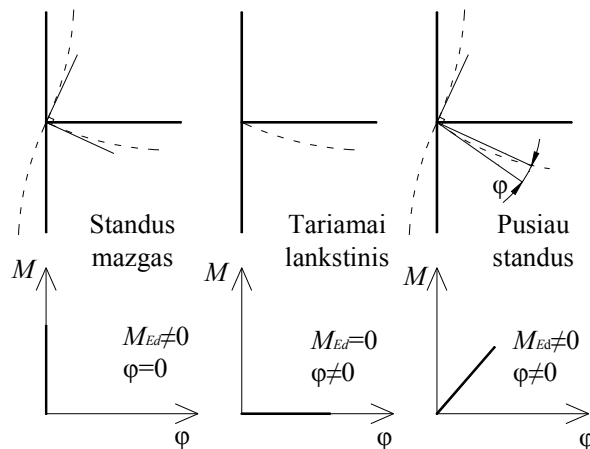
$$S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b, \quad (1.1)$$

čia $k_b = 8$, jei suvaržytas rėmas, jei $k_b = 25$, rėmas nesuvaržytas.

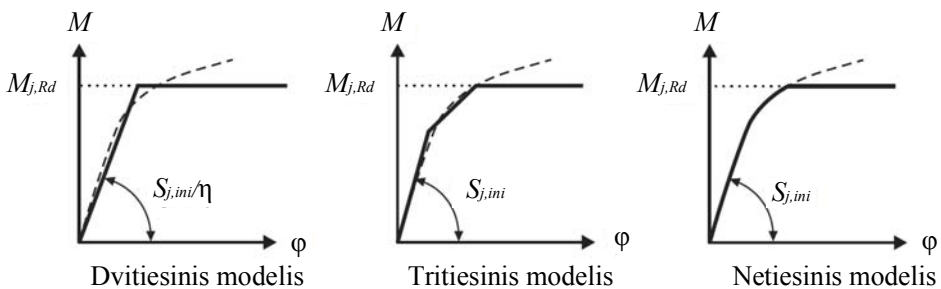
Mazgas yra tariamai lankstinis, jei:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 EI_b / L_b. \quad (1.2)$$

Mazgas yra pusiau standus, jei jis nepatenka į standaus ir tariamai lankstinio mazgo apibrėžčių sritį.



1.10 pav. Mazgų skirstymas pagal sukamąjį standį
Fig. 1.10. Classification of joints according to rotational stiffness



1.11 pav. M/φ kreivės idealizavimas (šaltinis: LST EN 1993-1-8)

Fig. 1.11. Idealisation of M/φ curve (source LST EN 1993-1-8)

M/φ kreivę, projektuojant plieninių rėmų konstrukcijas, yra nepatogu naudoti, nes tokiu atveju reikalinga antrosios eilės netiesinė analizė, kurią nėra patogu naudoti. Norint konstrukcijas projektuoti remiantis pirmosios eilės analize, projektavimo normos 1993-1-8 (2007) siūlo keletą būdų, kaip idealizuoti M/φ kreivę (1.11 pav.). Analizei galima naudoti tiesinį kreivės variantą. Jei $M_{j,Ed} \leq 2/3M_{j,Rd}$, tai analizei galima naudoti mazgo pradinį sukamąjį standį $S_{j,ini}$. Jei $M_{j,Ed} > 2/3M_{j,Rd}$, tada taip pat galima naudoti tiesinį modelį $S_{j,ini}/\eta$.

Padaryta nemažai laboratorinių viso rėmo bandymų, kuriuos atliekant nagrinėjama mazgo sukamojo standžio įtaka viso rėmo elgsenai, ir pateikta tyrimų rezultatų. Ali *et al.* (2010, 2011) atliko rėmo, kurio elementai buvo padaryti iš C formos elementų, bandymus. Mokslininkai atliko 10 bandymų. Kolonos pėdos sukamasis standis buvo apie 90 kNm/rad ir turėjo neigiamą įtaką viso rėmo laikomajai galiai. Dubina (2008) išbandė rėmus, kurių elementai buvo padaryti iš sudvejintų C formos elementų, o mazgai – iš varžtų su mazginiais lakštais. Apdorojus bandymų rezultatus prieita prie išvadų, kad mazgų elgsena visada pusiau standi. Jei projektuotojas priims mazgus kaip standžius, tada bus pervertinta viso rėmo laikomoji galia. Tan (2001) atliko bandymus rėmų, kurių elementai sujungti kampuočiais ir varžtais. Tyrimai parodė, kad mazgai yra pusiau standūs. Apibendrinant literatūros šaltinius galima teigti, kad mazgų elgsena dažniausiai būna pusiau standi, mazgų sukamasis standis turi būti vertinamas atliekant visuminę rėmo analizę, nes šis standis turi įtakos lenkiamojo momento persiskirstymui, antrosios eilės efektams ir turi įtakos viso rėmo laikomajai galiai.

1.3. Komponentų (mechaninis) metodas

Mazgo laikomąją galią ir sukamąjį standį galima nustatyti įvairiais metodais: empiriniais, analitiniais, mechaniniais, atliekant modeliavimą baigtinių elementų metodu, taip pat laboratorinius tyrimus.

Tiksliausias iš minėtų metodų yra laboratoriniai tyrimai, tačiau jiems reikia gana daug materialinių išteklių, tad jie laikomi nepraktiškais projektuojant kasdieną. Paprastai laboratoriniai tyrimai atliekami mokslinių tyrimų tikslais, kartu taikant ir kitus metodus, nes bandymams yra reikalinga brangi įranga ir aukštos kvalifikacijos personalas.

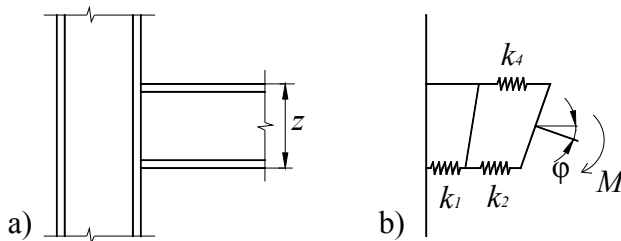
Taikant empirinius metodus, naudojamos matematinės formulės, gaunamos regresinės analizės būdu. Į matematinės išraiškas įrašomi tam tikri mazgo geometriniai parametrai koeficientai, gaunami įvairiais būdais – taikant analitinius, mechaninius modelius, atliekant modeliavimą baigtinių elementų metodu, taip pat laboratorinius tyrimus. Šiuo metodu gaunamos M/φ kreivės (Frye ir Morris 1975; Azizinamini *et al.* 1985; Kishi 1994; Krishnamurthy 1978a, 1978b). Šių modelių trūkumas tas, kad tiriamasis mazgas savo geometrija turi būti panašus į formulę

tikslinti naudojamus mazgus. Be to, empiriniai metodai neperteikia kiekvieno mazgo komponento įtakos viso mazgo sukamajam standžiui.

Taikant analitinius metodus (Yee ir Melchers 1986; Johnson ir Law 1981) naudojamos analitinės išraiškos, kuriomis nustatomas pradinis mazgo sukamasis standis ir laikomoji galia. Tačiau visai kreivei aprašyti taip pat naudojami laboratorinių tyrimų duomenys ir taikomas regresinės analizės būdas. Šio metodo naudotojas turi patikrinti, ar jo mazgas yra artimas M/φ kreivei tikslinti naudotiems bandiniams.

Modeliuojant baigtinių elementų metodu sudaromas mazgo modelis iš strypinių, plonasienių ir tūrinių baigtinių elementų. Tobulėjant kompiuterių technikai ir programinei įrangai, šis metodas taikomas vis dažniau. Labai svarbu teisingai aprašyti kraštines sąlygas ir netiesines medžiagos savybes. Pagrindinis šio metodo trūkumas tas, kad skaičiavimo greitis ir tikslumas labai priklauso nuo naudotojo kvalifikacijos ir naudojamo kompiuterio procesoriaus galingumo. Todėl šis metodas plačiau taikomas atliekant mokslinius mazgų tyrimus, bet dėl sudėtingumo rečiau – praktiniam projektavimui.

Mechaniniu (komponentų) metodu mazgas nagrinėjamas kaip sudarytas iš atskirų komponentų. Komponentų metodas paprastai taikomas siekiant nustatyti mazgo pradinį sukamąjį standį ir laikomąją galią. Šio metodo privalumas tas, kad mazgas suskaidomas į baigtinį skaičių komponentų, kurių laikomoji galia ir sukamasis standis yra aprašomi. Dėl savo universalumo metodas įtrauktas į projektavimo normas. Pagrindinis šio metodo trūkumas tas, kad yra ištyrinėti ir aprašyti tik pagrindiniai dažniausiai naudojamų mazgų komponentai, ir jis beveik nėra taikomas mazgams iš plieninių šaltai lankstytų elementų.



1.12 pav. Komponentų metodo taikymas virintiniam mazgui: a) mazgo schema; b) mazgo mechaninis modelis (šaltinis: <https://orbi.ulg.ac.be>)

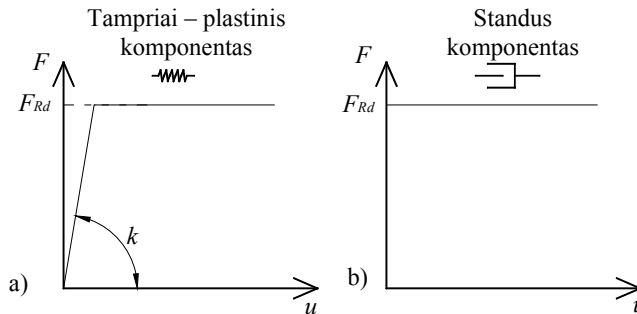
Fig. 1.12. Application of component method to welded connection a) connection scheme; b) mechanical model (source <https://orbi.ulg.ac.be>)

Komponentų metodas (Jaspart 2000; Jaspart and Demonceau 2008; Hoang *et al.* 2014a, 2014b, 2015) gali būti taikomas mazgų laikomajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Komponentų metodo esmė – sudaryti mazgo mechaninį

modelį ir suskirstyti analizuojamą mazgą į tam tikrą individualių aktyvių komponentų skaičių. Pavyzdžiui, 1.12 paveiksle pateiktas įprastas virintinis mazgas suskirstomas į šiuos aktyvius komponentus: k_1 – šlyjamą kolonos sienelę, k_2 – gniuždomą kolonos lentyną, k_4 – tempiamą kolonos lentyną. Tas pats komponentas nebūtinai gali būti vertinamas skaičiuojant mazgo laikomąją galią arba sukamąjį standį, todėl komponentai yra dviejų tipų (1.13 pav.): standūs, turintys įtakos tik mazgo laikomajai galiai, ir tampriai plastiniai, turintys įtakos mazgo sukamajam standžiui ir laikomajai galiai. Pavyzdžiui, virintinės siūlės vertinamos skaičiuojant mazgo laikomąją galią, tačiau vertinant mazgo sukamąjį standį – nevertinamos, nes jų suirtis yra trapioji.

Komponentų metodas mazgų analizei taikomas taip:

- Analizuojamasis mazgas suskirstomas į aktyvius komponentus mazgo laikomajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti.
- Apskaičiuojama kiekvieno komponento stiprio ir standžio tam tikrų charakteristikų – pradinio sukamojo standžio, lenkiamosios galios – arba viso komponento M/φ kreivės arba F/u (poslinkio priklausomybė nuo apkrovos) skaitinė vertė.
- Visi komponentai surenkami ir įvertinama kiekvieno iš jų įtaką viso mazgo laikomajai galiai ir sukamajam standžiui.



1.13 pav. Komponento apkrovos ir poslinkio sąryšis: a) tampriai plastinis; b) standus (šaltinis: Faella *et al.* 2000)

Fig. 1.13. Force and displacement relationship of component: a) elastoplastic; b) rigid (source Faella *et al.* 2000)

Europos Sąjungoje galiojančiose projektavimo normose EC 1993-1-8 pateikta metodika sukamajam standžiui skaičiuoti pritaikyta tik tiems mazgams, kurie skirti karštai valcuotiems dvitėjo skerspjūvio elementams. Normose aprašytų komponentų standžio koeficientų formulių galiojimo ribos nurodytos, kai elementų storis didesnis arba lygus 4 mm. Projektavimo normose EC 1993-1-3 ir EC

1993-1-5, skirtose plieniniams šaltai lankstytiems elementams ir jų mazgams skaičiuoti, nėra pateikta praktinio metodo plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamajam standžiui skaičiuoti ir įvertinti. Taigi šiuo metu galiojančiose projektavimo normose ir mokslinėje literatūroje nėra pateikta komponentų metodo, kuriuo būtų vertinamas plieninių šaltai lankstytų elementų mazgo su mazginiu lakštu ir varžtais sukamasis standis ir laikomoji galia. Reikalinga komponentų metodu grįsta skaičiavimo metodika, kuri būtų praktiškai taikoma ir leistų projektuotojui įvertinti šių mazgų sukamąjį standį ir laikomąją galią.

1.4. Plieninių šaltai lankstytų elementų pusiau standžių varžtinių mazgų skaičiavimo modeliai

Šiame poskyryje pateikiami plieninių šaltai lankstytų elementų kerpamųjų varžtinių mazgų skaičiavimo modeliai. Toliau plačiau aprašomas Yu *et al.* (2005) empirinis modelis, skirtas plieninių šaltai lankstytų elementų mazgams su varžtais ir mazginiu lakštu sukamajam standžiui skaičiuoti. Taip pat apžvelgiami Lim ir Nethercot (2004) bei Dubina ir Ungureanu (2010) empiriniai modeliai. Komponentų metodo taikymo plieninių šaltai lankstytų elementų varžtiniams mazgams skaičiuoti atvejų disertacijos autoriui nepavyko rasti.

1.4.1. Yu ir kt. modelis

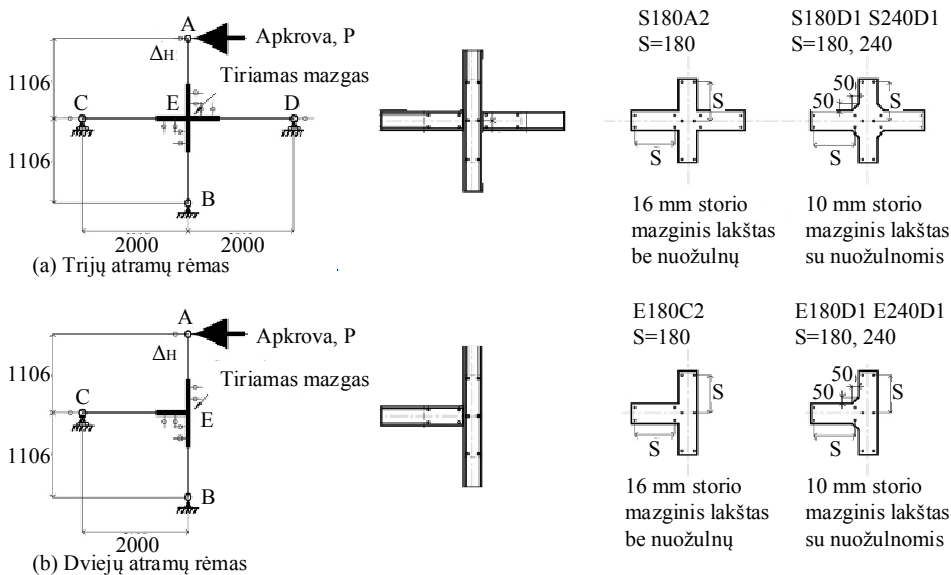
Yu *et al.* (2005) tyrė varžtines sijos ir kolonos mazgus, kuriuose plieniniai šaltai lankstyti C formos sudvejinti elementai jungiami mazginiais lakštais ir varžtais. Atliekant laboratorinius tyrimus ir modeliuojant baigtinių elementų metodu, iš viso ištirta 16 rėminių konstrukcijų (1.14 pav.). Autoriai tyrė elementų laikomąją galią ir mazgo sukamąjį standį. Straipsnyje pasiūlyta metodika jungties sukamajam standžiui skaičiuoti ir modeliavimui atlikti baigtinių elementų metodu. Atstumai tarp varžtų jungtyje – 180 arba 240 mm, o mazginio lakšto storis – 10 arba 16 mm. C formos elementų sienelės aukštis – 150 mm, storis – 2 mm.

Mazgo pasisukimas matuotas įlinkiamačiais, pritvirtintais prie sijos ir kolonos. Apdoroję laboratorinių tyrimų rezultatus, mazgo M/φ kreivę autoriai idealizavo į trijų tiesių modelį (1.15 pav.): pirma tiesė rodo, kad mazgas deformuojasi esant tampriajai stadijai, antra tiesė rodo, kad mazgas deformuojasi esant tampriai plastinei būsenai dėl elementų sienelės glemžimo, trečia tiesė rodo irtį. Nors įprastai plieninių šaltai lankstytų elementų irtis yra staigi, bet siekiant supaprastinti trečioji tiesė imta horizontali kaip karštai valcuotų elementų mazgų.

Autoriai taip pat padarė išvadas apie tai, kas turi įtakos mazgo sukamajam standžiui:

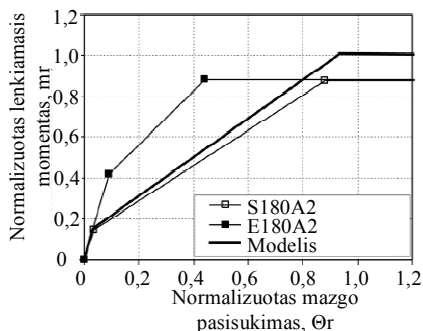
- sijos ir kolonos sienelių elementų glemžimo deformacija;

- skirtumas tarp varžto ir skylių skersmenų (pradinis praslydimas);
- elementų ir mazginio lakšto šlyties ir lenkimo deformacijos;
- praslydimas tarp atramų (jei tokių yra) ir plieninių šalta lankstytų elementų.



1.14 pav. Yu *et al.* (2005) laboratorinių tyrimų ir modeliavimo baigtinių elementų metodu bandiniai

Fig. 1.14. Specimens of Yu *et al.* (2005) laboratory investigation and numerical modeling



1.15 pav. Yu *et al.* (2005) idealusis trijų tiesių M/φ modelis

Fig. 1.15. Idealised three linear M/φ model by Yu *et al.* (2005)

Tyrėjai pasiūlė metodiką, skirtą jų tirtu mazgo sukamajam standžiui apskaičiuoti. Pagal anksčiau pateiktas išvadas viso mazgo sukamasis standis susideda iš plieninių šaltai lankstytų elementų sukamojo standžio, varžtų glemžiamųjų elementų sienelių sukamojo standžio ir mazginio lakšto sukamojo standžio.

Mazgo sukamasis standis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\frac{1}{K_{con}} = \frac{1}{K_{cfs}} + \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_{gp}}, \quad (1.3)$$

čia $\frac{1}{K_{con}}$ – mazgo sukamasis standis; $\frac{1}{K_{cfs}}$ – plieninių šaltai lankstytų elementų sukamasis standis; $\frac{1}{K_b}$ – glemžiamųjų plieninių šaltai lankstytų elementų sienelių sukamasis standis; $\frac{1}{K_{gp}}$ – mazginio lakšto sukamasis standis.

K_{cfs} apskaičiuojamas taip:

$$K_{cfs} = \frac{3(EI)_{cfs}}{l_{con}}, \quad (1.4)$$

čia E – plieno tamprumo modulis; I_{cfs} – plieninių šaltai lankstytų elementų inercijos momentas; l_{con} – jungties ilgis.

K_b apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

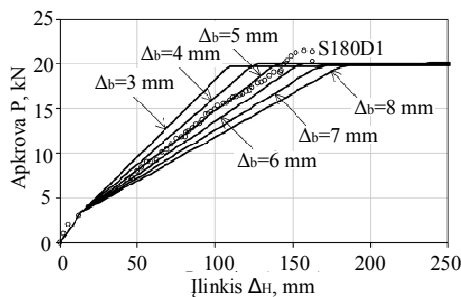
$$K_b = \frac{M}{\theta_b}, \quad (1.5)$$

čia M – veikiantis lenkiamasis momentas.

θ_b apskaičiuojamas remiantis šia formule:

$$\theta_b = \frac{\Delta_b}{r}, \quad (1.6)$$

čia Δ_b – elementų sienelių glemžiamosios deformacijos; r – atstumas nuo varžtų sukimosi centro iki tolimiausio varžto.



1.16 pav. Yu *et al.* (2005) gembės poslinkio priklausomybė nuo dydžio Δ_b
Fig. 1.16. Cantilever deflection and Δ_b relationship by Yu *et al.* (2005)

ties kiekvienu varžtu proporcinga atstumui nuo varžtų grupės sukimosi centro (1.18 pav., b).

Autoriai pasiūlė formulę varžtų grupės sukamajam standžiui apskaičiuoti:

$$k_B = \frac{M}{\theta_B} = k_b \sum_{i=1}^n d_i^2. \quad (1.7)$$

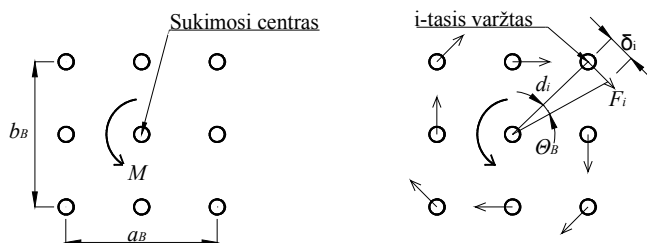
Varžtų grupės pasisukimas:

$$\theta_B = \frac{c}{k_b}. \quad (1.8)$$

Konstanta c :

$$c = \frac{M}{\sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad (1.9)$$

čia k_b – varžto linijinis standis, randamas laboratoriniais bandymais.



1.18 pav. Lim ir Nethercot (2004) tirta jungtis sukamajam standžiui skaičiuoti

Fig. 1.18. Lim ir Nethercot (2004) connection under rotational stiffness investigation

1.3 lentelė. Varžtų grupės sukamasis standis

Table 1.3. Rotational stiffness of bolt group

Varžtų skaičius	k_b
$2 \times 2 = 4$	$(a_B^2 + b_B^2)k_b$
$3 \times 3 = 9$	$\frac{3}{2}(a_B^2 + b_B^2)k_b$
$4 \times 4 = 16$	$\frac{20}{9}(a_B^2 + b_B^2)k_b$
$5 \times 5 = 25$	$\frac{25}{8}(a_B^2 + b_B^2)k_b$

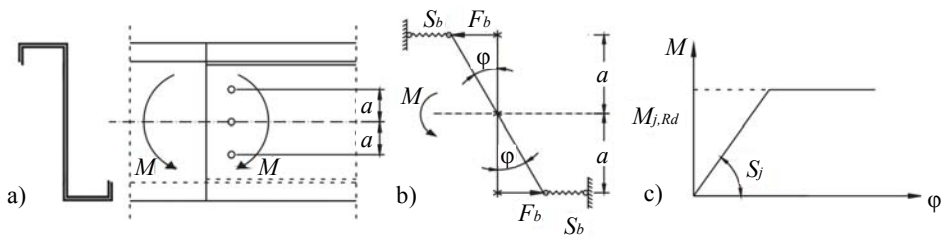
Varžtų grupės sukamasis standis k_B gali būti apskaičiuojamas remiantis 1.3 lentele.

1.4.3. Dubina ir Ungureanu modelis

Dubina ir Ungureanu (2010) tyrė sijos ir sijos užleistinius mazgus. Atlikę mazgų laboratorinius tyrimus, priėjo prie išvadų, kad šių mazgų sukamasis standis labiausiai priklauso nuo glemžiamos elementų sienelės, ir M/φ grafikas gali būti aprašytas tiese (Slocum 1992; Bryan 1993) (1.17 pav.). Buvo pasiūlyta formulė, kaip skaičiuoti mazgo sukamąjį standį, kuris įvertina tik sienelės glemžiamąsias deformacijas:

$$S_j = \frac{M}{\varphi} = \frac{13.6a^2\sqrt{d}}{\left(\frac{5}{t_1} + \frac{5}{t_2} - 1\right)}, \quad (1.10)$$

čia d – varžto skersmuo; t_1, t_2 – elementų sienelių storis; a – atstumas nuo sukimosi centro iki varžto.



1.17 pav. Dubina ir Ungureanu (2010) modelis sukamajam standžiui skaičiuoti:

a) mazgo schema; b) mechaninis modelis; c) M/φ grafikas

Fig. 1.17. Dubina ir Ungureanu (2010) model for rotational stiffness calculation:

a) connection detailing; b) calculation model; c) M/φ curve

Tačiau iš Chung ir Ip (2001), Wang *et al.* (2012) tyrimų išvadų matyti, kad sienelės glemžimo deformacijos turėtų būti aprašytos netiesiškai (Neto *et al.* 2016).

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Kitų autorių tyrimų apžvalga parodė, kad plieninių šalta lankstytų elementų varžtiniai kerpamieji mazgai pagal sukamojo standžio klasifika-

vimą yra pusiau standūs mazgai. Tačiau trūksta šių mazgų elgsenos tyrimų, tad laikomosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimai nėra iki galo išplėtoti.

2. Komponentų metodas yra nesudėtingas taikyti, plačiai paplitęs karštai valcuotų elementų mazgų laikomajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Tačiau nėra pakankamai mokslinių tyrimų apie komponentų metodo taikymą plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų laikomajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Projektavimo normose (eurokoduose) taip pat nėra pateikta metodikos plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamajam standžiui skaičiuoti.
3. Literatūroje nėra pasiūlyta modelių sudvejintų elementų varžtinių mazgų su mazginiu lakštu sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti taikant komponentų metodą.
4. Kadangi mazgo elgsena turi didelę įtaką įrąžų pasiskirstymui ir deformacijoms plieninio rėmo elementuose, mazgo sukamojo standžio skaičiavimo metodika leistų tiksliau apskaičiuoti įrąžų pasiskirstymą ir ekonomiškai projektuoti konstrukcijas.

Atlikus kitų autorių tyrimų apžvalgą, disertacijoje sprendžiami šie uždaviniai:

1. Išplėtoti komponentų metodą analizuojamam pusiau standžiam plieninių šaltai lankstytų elementų varžtiniam mazgui su mazginiu lakštu.
2. Parengti bandymų planą ir atlikti analizuojamo konstrukcinių matmenų mazgo laboratorinius bei modeliavimo baigtinių elementų metodu tyrimus, nustatyti mazgo pasisukimo dėl veikiančio lenkiamojo momento sąryšius, laikomąją galią, pradinį sukamąjį standį ir irties pobūdžius.

Teoriniai tyrimai ir modeliavimas komponentų metodu

Šiame skyriuje pristatomas komponentų metodas, skirtas plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų (2.1) laikomajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti. Mazgo ir atskirų jo dalių laikomosios galios bei sukamojo standžio išraiškos patikrintos remiantis laboratorinių bandymų ir modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatais. Pagal pateiktą metodiką skaičiuojama dviejų tipų – stačiakampio ir T formos (2.2 pav.) – mazginių lakštų laikomoji galia ir sukamasis standis. Kai kolonos sienelė parinkta iš plonesnio storio elementų, reikalingas didesnis atstumas tarp varžtų eilių ir pasirinktas T formos mazginis lakštas, o kai kolonos elemento sienelė parinkta iš storesnio lakšto, aktualesnis yra stačiakampio formos mazginis lakštas.

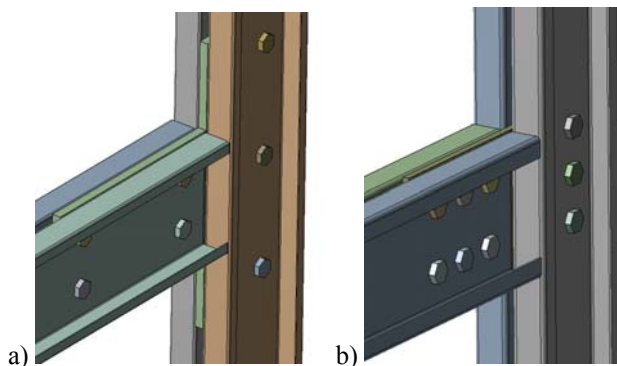
Šiame skyriuje:

- pasiūlyta tyrinėjamo mazgo laikomosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimo metodika, pateikta komponentų metodu;
- pateiktas mechaninis mazgo modelis;
- pasiūlyta metodika teoriniams mazgą sudarančių aktyvių komponentų stiprio ir standžio koeficientams apskaičiuoti.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi mokslinės publikacijos (Bučmys ir Daniūnas 2015b, 2017b).

2.1. Aktyvieji sukamojo standžio ir laikomosios galios komponentai

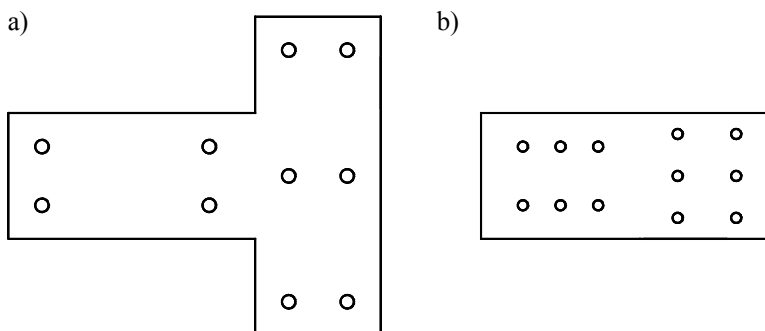
Komponentų metodo esmė – visą mazgą suskirstyti į baigtinių komponentų skaičių ir įvertinti kiekvieno jų standžio koeficientus ir stiprį. Plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinio mazgo pradinio sukamojo standžio reikšmė $S_{j,ini}$ ir laikomoji galia $M_{j,Rd}$ priklauso nuo mazgą sudarančių komponentų standžio koeficientų reikšmių ir stiprio. Komponentai gali būti aprašomi kaip standūs, jei turi įtakos tik laikomajai galiai, arba tamptariai plastiniai, jei turi įtakos sukamajam standžiui ir laikomajai galiai. Viso mazgo pradinis sukamasis standis ir laikomoji galia apskaičiuojama sumuojant mazgo komponentų stiprio ir standžio koeficientus.



2.1 pav. Analizuojamasis mazgas iš plieninių šaltai lankstytų elementų ir su:

a) T formos mazginiu lakštu; b) stačiakampio formos mazginiu lakštu

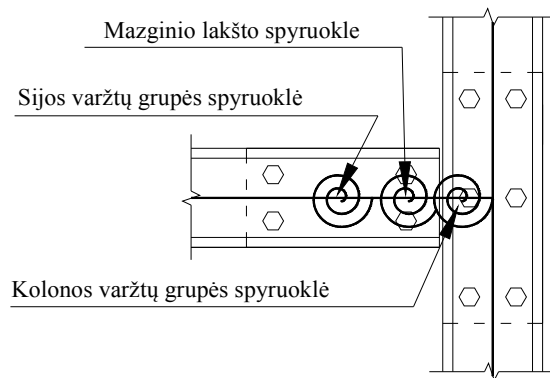
Fig. 2.1. Cold formed steel joint under analysis with: a) T form gusset plate; b) rectangular form gusset plate



2.2 pav. Mazginiai lakštai: a) T formos; b) stačiakampio formos

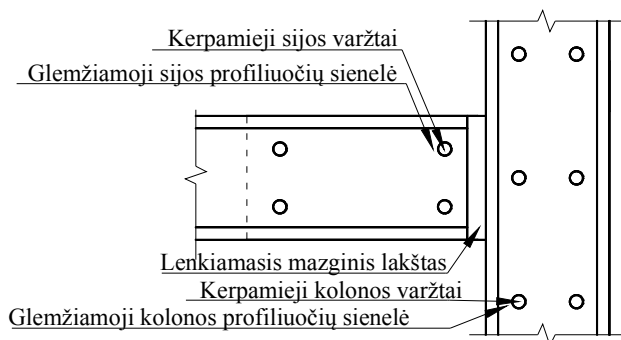
Fig. 2.2. Gusset plate a) T form; b) rectangular form

Mazgą patogų skaidyti į tris atskiras spyruokles – sijos ir kolonos varžtų grupes bei mazginį lakštą (2.3 pav.). Šios trys spyruoklės deformuojasi nepriklausomai viena nuo kitos, todėl vienos spyruoklės laikomoji galia ir sukamasis standis neturi įtakos kitų spyruoklių laikomajai galiai ir sukamajam standžiui, bet daro įtaką viso mazgo laikomajai galiai ir sukamajam standžiui. Taip analizuoti mazgą yra patogų, nes sijoje ir kolonoje esantys varžtai sukasi apie skirtingus taškus. Šios dvi varžtų grupės yra veikiamos skirtingo lenkiamojo momento. Dėl šios priežasties kiekviena spyruoklė gali būti aprašoma atskira M/φ kreive. Tačiau Lietuvoje galiojančiose projektavimo normose (eurokoduose) nėra pateikta metodikos, kaip apskaičiuoti mazgų, sudarytų iš kelių spyruoklių, laikomąją galią ir sukamąjį standį.



2.3 pav. Pusiau standaus varžtinio mazgo trijų spyruoklių modelis

Fig. 2.3. Three spring model of semi-rigid bolted connection

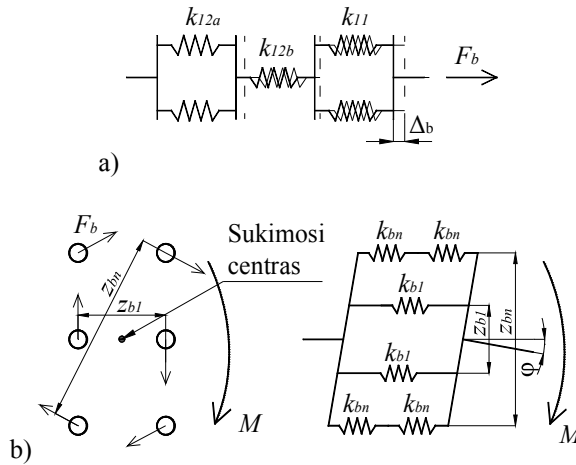


2.4 pav. Analizuojamo pusiau standaus mazgo aktyvūs komponentai

Fig. 2.4. Active components of analysed semi-rigid joint

2.4 paveiksle pateikiami aktyvūs tiriamo mazgo komponentai, turintys įtakos laikomajai galiai ir sukamajam standžiui. Analizuojamame mazge išskiriami šie aktyvūs komponentai:

- glemžiamosios sijos ir kolonos plieninių šaltai lankstytų elementų sienelės;
- glemžiamoji mazginio lakšto sienelė;
- kerpamieji sijos ir kolonos varžtų grupių neįtempiamieji varžtai;
- lenkiamasis mazginis lakštas.



2.5 pav. Mechaniniai modeliai: a) vieno varžto spyruoklės mechaninis modelis: k_{12a} – glemžiamoji plieninio šaltai lankstyto elemento sienelė, k_{12b} – glemžiamasis mazginis lakštas, k_{11} – kerpamasis varžtas; b) varžtų grupės spyruoklės mechaninis modelis: F_b – varžtą veikianti apkrova, z_{b1} – atstumas tarp pirmosios eilės varžtų, z_{bn} – atstumas tarp n -tosios eilės varžtų, M – varžtų grupę veikiantis lenkiamasis momentas, k_{b1} – pirmojoje eilėje esančio varžto standžio koeficientas, k_{bn} – n -tojoje eilėje esančio varžto standžio koeficientas

Fig. 2.5. Mechanical models: a) one bolt spring mechanical model: k_{12a} – cold formed steel element wall in bearing, k_{12b} – gusset plate in bearing, k_{11} – bolt in shear; b) mechanical model of bolt group spring: F_b – force in bolt, z_{b1} – distance between 1st bolt row, z_{bn} – distance between n th bolt row, M – bending moment in bolt group, k_{b1} – stiffness coefficient of bolt in first row, k_{bn} – stiffness coefficient of bolt in n th row

Mazgo laikomajai galiai ir sukamajam standžiui poveikį turi visi pirmiau išvardyti komponentai. 2.5 paveiksle pateikiamas mazgo varžto ir varžtų grupių mechaninis modelis, kuriame išskiriami tampriai plastiniai mazgo komponentai.

Šių sijos ir kolonos varžtų grupių komponentų standžio koeficientai nustatomi pagal LST EN 1993-1-8 (2007) standarte pateikiamas išraiškas. Šios išraiškos pritaikytos, nes standartas taip pat grindžiamas universaliu komponentų metodu.

2.2. Mazgo laikomosios galios skaičiavimas

Mazginio lakšto laikomosios galios skaičiavimo metodika remiasi prielaida, kad mazgas yra suvaržytas iš plokštumos. Analizuojamo mazgo laikomoji galia $M_{j,Rd}$ priklauso nuo trijų spyruoklių laikomųjų galių:

- sijos varžtų grupės $M_{bbg,Rd}$;
- kolonos varžtų grupės $M_{cbg,Rd}$;
- mazginio lakšto $M_{gp,Rd}$.

Pusiau standaus mazgo laikomoji galia priklauso nuo silpniausios spyruoklės laikomosios galios:

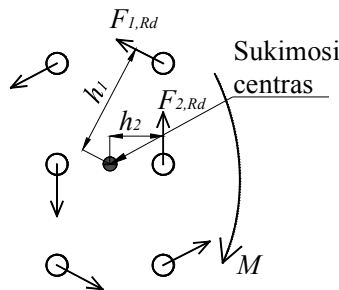
$$M_{j,Rd} = \min(M_{bbg,Rd}; M_{cbg,Rd}; M_{gp,Rd}). \quad (2.1)$$

Varžtų grupės laikomoji galia priklauso nuo silpniausio komponento stiprio. Šių komponentų stiprio apskaičiavimo metodika pateikta LST EN 1993-1-8 (2007) ir LST EN 1993-1-3 (2008) standartuose. Sijos varžtų grupės laikomoji galia $M_{bbg,Rd}$ ir kolonos varžtų grupės laikomoji galia $M_{cbg,Rd}$ priklauso nuo šių aktyvių komponentų stiprio:

- sijos ir kolonos glemžiamųjų elementų sienelių $F_{bcf,Rd}$;
- glemžiamojo mazginio lakšto $F_{bgp,Rd}$;
- kerpamojo varžto $F_{v,Rd}$.

Varžto stipris taikomas kaip silpniausio komponento stipriui:

$$F_{Rd} = \min(F_{bcf,Rd}; F_{bgp,Rd}; F_{v,Rd}). \quad (2.2)$$



2.6 pav. Varžtų grupės reakcijos jėgos nuo veikiančio lenkiamojo momento
Fig. 2.6. Reaction forces of bolt group from bending moment

Sijos ir kolonos varžtų grupių (2.6 pav.) laikomoji galia apskaičiuojama taip:

$$M_{bbg,Rd} = \sum_{r=1}^n h_r \cdot F_{Rd}, \quad (2.3)$$

$$M_{cbg,Rd} = \sum_{r=1}^n h_r \cdot F_{Rd}, \quad (2.4)$$

čia F_{Rd} – vieno r -tojo varžto stipris; h_r – atstumas nuo r -tojo varžto iki varžtų grupės sukimosi centro; r – varžto numeris; n – varžtų skaičius.

Kadangi tariama, kad mazginis lakštas deformuosis tik plokštumoje, tokiu atveju bus pasiekti takumo įtempiai per visą lenkiamą skerspjūvį. Mazginio lakšto laikomoji galia $M_{gp,Rd}$ gali būti apskaičiuota taip:

$$M_{gp,Rd} = \sigma_y \cdot W_{pl}, \quad (2.5)$$

čia σ_y – plieno stipris pagal takumo ribą; W_{pl} – plastinis mazginio lakšto silpniausio pjūvio atsparumo momentas.

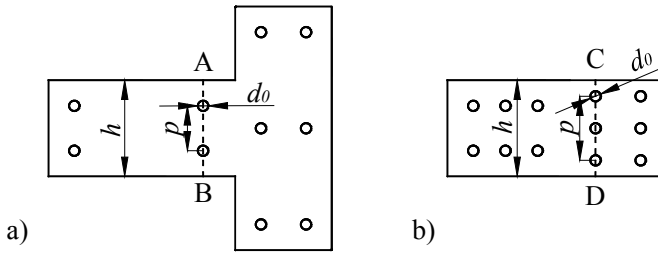
Plastinis atsparumo momentas silpniausio mazginio lakšto pjūvio vietoje gali būti apskaičiuojamas, kai sijos varžtų grupėje yra dvi eilės varžtų (2.7 pav., a):

$$W_{pl} = \frac{t \cdot h^2}{4} - t \cdot d_0 \cdot p_1 \quad (2.6)$$

ir trys eilės varžtų (2.7 pav., b):

$$W_{pl} = \frac{t \cdot h^2}{4} - t \cdot d_0 \cdot p_1 - \frac{t \cdot d_0^2}{4}, \quad (2.7)$$

čia t – mazginio lakšto storis; h – skerspjūvio aukštis; d_0 – varžtų skylės skersmuo; p_1 – atstumas tarp varžtų.



2.7 pav. Skerspjūviai, kuriuose vyksta iritis: a) A–B dvi varžtų eilės; b) C–D trys varžtų eilės

Fig. 2.7. Failure cross section: a) A–B with two bolt rows; b) C–D with three bolt rows

Mazgo laikomoji galia priklauso nuo anksčiau aptartų komponentų stiprio.

Toliau aprašomas komponentų, apimančių kolonos ir sijos varžtų grupes, stipris.

Plieninio šaltai lankstyto elemento sienelės glemžiamoji galia $F_{bcf,Rd}$ apskaičiuota pagal LST EN 1993-1-3 (2008) standarto 8.4 lentelę:

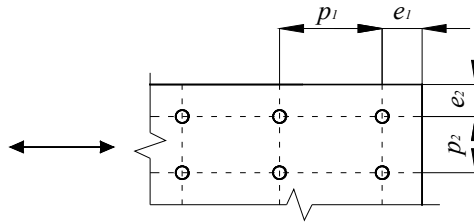
$$F_{bcf,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}, \quad (2.8)$$

čia α_b – mažesnioji iš tokių reikšmių: 1,0 arba $\frac{e_1}{3 \cdot d}$, čia e_1 – atstumas nuo varžto centro iki iškyšos galo apkrovos veikimo kryptimi, d – varžto skersmuo; $k_t = \frac{(0,8 \cdot t + 1,5)}{2,5}$, kai $0,75 \text{ mm} \leq t < 1,25 \text{ mm}$; $k_t = 1,0$, kai $t > 1,25 \text{ mm}$, t – elemento sienelės storis.

Mazginio lakšto, kuris glemžiamas varžtais, glemžiamoji galia $F_{bgp,Rd}$ apskaičiuota pagal LST EN 1993-1-8 (2007) standarto 3.4 lentelę (2.8 pav.):

$$F_{bgp,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}, \quad (2.9)$$

čia α_b – mažesnioji iš reikšmių: $\frac{f_{ub}}{f_u}$ arba 1,0; apkrovos perdavimo kryptimi: galinių varžtų $\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$; vidinių varžtų $\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$. Statmenai apkrovos kryptimi: kraštinių varžtų: k_1 yra mažiausioji iš reikšmių: $2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ arba 2,5; vidinių varžtų k_1 yra mažiausioji iš reikšmių: $1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ arba 2,5, t – mazginio lakšto storis.



2.8 pav. Atstumų tarp jungių simboliai (šaltinis: LST EN 1993-1-8)

Fig. 2.8. Marking between bolt holes (source LST EN 1993-1-8)

Varžtų šlyjiamoji galia $F_{v,Rd}$ apskaičiuota pagal LST EN 1993-1-3 (2008) standarto 8.4 lentelę.

Kai varžtai yra 4.6, 5.6 arba 8.8 stiprumo klasės:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (2.10)$$

kai varžtai yra 4.8, 5.8, 6.8 arba 10.9 stiprumo klasės:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (2.11)$$

čia f_{ub} – plieno stipris pagal stiprumo ribą; A_s – kerpamojo varžto skerspjūvio plotas; γ_{M2} – dalinis koeficientas mazgų laikomajai galiai.

2.3. Mazgo sukamojo standžio skaičiavimas

Mazgo pasisukimas lygus visų trijų spyruoklių pasisukimų sumai:

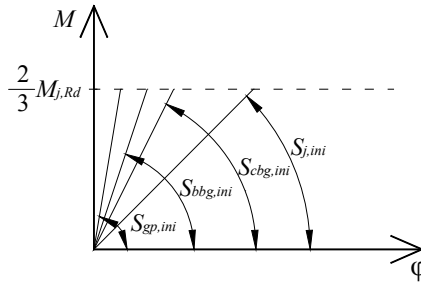
$$\varphi = \varphi_{gp} + \varphi_{bbg} + \varphi_{cbg}, \quad (2.12)$$

čia φ – mazgo pasisukimas; φ_{gp} – mazginio lakšto pasisukimas; φ_{bbg} – sijos varžtų grupės pasisukimas; φ_{cbg} – kolonos varžtų grupės pasisukimas.

Viso mazgo pradinis sukamasis standis yra lygus visų spyruoklių pradinių sukamųjų standžių sumai (2.9 pav.):

$$S_{j,ini} = \frac{1}{\frac{1}{S_{gp,ini}} + \frac{1}{S_{bbg,ini}} + \frac{1}{S_{cbg,ini}}}, \quad (2.13)$$

čia $S_{gp,ini}$ – mazginio lakšto pradinis sukamasis standis; $S_{bbg,ini}$ – sijos varžtų grupės pradinis sukamasis standis, $S_{cbg,ini}$ – kolonos varžtų grupės pradinis sukamasis standis.

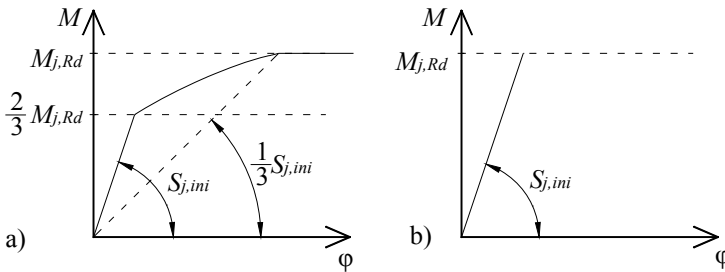


2.9 pav. Mazgo pradinis sukamasis standis

Fig. 2.9. Initial rotational stiffness of joint

Mazgo M/φ kreivė pateikta 2.10 a paveiksle, pagal LST EN 1993-1-8 (2007) standartą. Pirmoji kreivės dalis reprezentuoja tiesinę mazgo elgseną, kai mazge deformacijos yra tik tampriosios ir lenkiamasis momentas M yra mažesnis nei $2/3 M_{j,Rd}$. Antroji dalis yra kreivė, kuri reprezentuoja, kad mazgas deformuojasi

tampriai plastiškai, o trečioji yra tiesė, kai mazgo sukamasis standis lygus nuliui ir reprezentuoja, kad atsivėrė plastinis lankstas. Kokia bus kreivės forma, priklauso nuo mazgo irties pobūdžio. Antroji ir trečioji kreivės dalys gali būti pasiektos tada, kai irties pobūdis yra tampriai plastinis, t. y. vyksta mazginio lakšto plieno patekėjimas. Tačiau jei irtį sukelia varžtų kirpimas arba sijos elementų sienelės vietinė kluptis, tampriai plastinių deformacijų M/φ funkcijoje (2.10 pav., b) nebus, ir jo elgsena aprašoma tiese, nes varžtų plienas įprastai yra aukštos klasės be aiškios takumo aikštelės.



2.10 pav. Mazgo M/φ kreivės: a) tritiesė; b) tiesinė

Fig. 2.10. Joint M/φ curves: a) three-linear; b) linear

Sijos ir kolonos varžtų grupių sukamieji standžiai $S_{bbg,ini}$ ir $S_{cbg,ini}$ gali būti apskaičiuojami naudojant šiuos aktyvius komponentus, aprašytus LST EN 1993-1-8 (2007) standarte:

- plieninių šaltai lankstytų elementų glemžiamosios sienelės (kiekvienoje varžtų grupėje glemžiamos dviejų elementų sienelės);
- glemžiamasis mazginis lakštas;
- kerpamieji varžtai (kiekvienas varžtas kerpamas dviejose plokštumose).

Vieno varžto standžio koeficientas k_b gali būti apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$\frac{1}{k_b} = \sum \frac{1}{k_i} = \frac{1}{k_{12a}} + \frac{1}{k_{12b}} + \frac{1}{k_{11}}, \quad (2.14)$$

čia k_b – vieno varžto standžio koeficientas; k_i – i -tojo komponento standžio koeficientas; k_{12a} – glemžiamosios elemento sienelės standžio koeficientas; k_{12b} – glemžiamąjo mazginio lakšto standžio koeficientas; k_{11} – kerpamojo varžto standžio koeficientas.

Kiekvienas varžtas varžtų grupėje yra veikiamas jėgos F_b , kuri gali būti nesunkiai apskaičiuojama iš veikiančio lenkiamojo momento M . Jėgos F_b ir deformacijų Δ_b sąryšis gali būti išreiškiamas taip (Jaspart ir Maquoui 1994):

$$F_b = k_b \cdot E \cdot \Delta_b, \quad (2.15)$$

čia k_b – vieno varžto standžio koeficientas; E – tamprumo modulis; Δ_b – deformacijos.

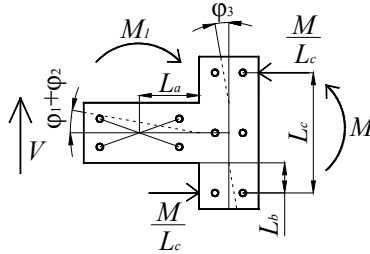
Varžtų grupės mechaninis modelis, integruojantis kiekvieną varžtą, pateiktas 2.5 b paveiksle. Sijos ir kolonos varžtų grupių pradiniai sukamieji standžiai gali būti apskaičiuojami taip:

$$S_{bbg,ini} = \frac{M_1}{\varphi_{bbg}} = \frac{E \cdot z_{b1}^2}{\frac{1}{k_{b1}}} + \dots + \frac{E \cdot z_{bn}^2}{\frac{1}{k_{bn}}}, \quad (2.16)$$

$$S_{cbg,ini} = \frac{M}{\varphi_{cbg}} = \frac{E \cdot z_{b1}^2}{\frac{1}{k_{b1}}} + \dots + \frac{E \cdot z_{bn}^2}{\frac{1}{k_{bn}}}, \quad (2.17)$$

čia M_1 – sijos varžtų grupę veikiantis lenkiamasis momentas M – kolonos varžtų grupę veikiantis lenkiamasis momentas; φ_{bbg} – sijos varžtų grupės pasisukimas; φ_{cbg} – kolonos varžtų grupės pasisukimas; E – plieno tamprumo modulis; z_{b1} , z_{bn} – atstumai tarp 1-osios ir n -tosios varžtų eilių (2.5 pav., b); k_{b1} , k_{bn} – 1-ojo ir n -tojo varžtų standžio koeficientai.

T formos mazginio lakšto pasisukimas φ_{gp} buvo analizuojamas kaip trijų iškyšų pasisukimų φ_1 , φ_2 , φ_3 suma nuo sijos varžtų grupę veikiančio lenkiamojo momento M_1 , mazginį lakštą veikiančios skersinės jėgos V ir mazgą veikiančio lenkiamojo momento M .



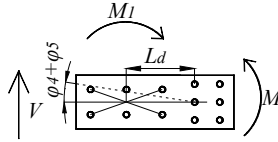
2.11 pav. T formos mazginio lakšto pasisukimo schema ir simboliai

Fig. 2.11. T form gusset plate rotational scheme and marking

T formos mazginio lakšto pradinis sukamasis $S_{gp,ini}$ standis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę (2.11 pav.):

$$S_{gp,ini} = \frac{M}{\varphi_{gp}} = \frac{M}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3} = \frac{M}{\frac{M_1 \cdot L_a}{E \cdot I_1} + \frac{V \cdot L_a^2}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{L_b^2 \cdot M}{2 \cdot L_c \cdot E \cdot I_2}} = \frac{M}{\frac{2 \cdot M_1 \cdot L_a + V \cdot L_a^2}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{L_b^2 \cdot M}{2 \cdot L_c \cdot E \cdot I_2}}, \quad (2.18)$$

čia L_a – atstumas nuo sijos varžtų grupės sukimosi centro iki mazginio lakšto horizontaliosios iškyšos pradžios; L_b – atstumas nuo kolonos varžtų grupės labiausiai nuo varžtų grupės centro nutolusio varžto centro iki vertikaliosios iškyšos pradžios; L_c – atstumas tarp labiausiai nutolusių kolonos varžtų grupės varžtų eilių; I_1 – mazginio lakšto horizontaliosios iškyšos inercijos momentas; I_2 – mazginio lakšto vertikaliosios iškyšos inercijos momentas; V – nuo siją veikiančios apkrovos atsiradusi skersinė jėga, kuri veikia sijos varžtų grupę; M_1 ir M – lenkiamasis momentas, veikiantis atitinkamai sijos varžtų grupę ir kolonos varžtų grupę.



2.12 pav. Stačiakampio formos mazginio lakšto pasisukimo schema ir simboliai
Fig. 2.12. Rectangular form gusset plate rotational scheme and marking

Stačiakampio formos mazginio lakšto pasisukimas φ_{gp} buvo analizuojamas kaip pasisukimų φ_4, φ_5 suma nuo sijos varžtų grupę veikiančio lenkiamojo momento M_1 , mazginį lakštą veikiančios skersinės jėgos V ir mazgą veikiančio lenkiamojo momento M . Stačiakampio formos mazginio lakšto pradinis sukamasis standis gali būti apskaičiuojamas pagal šią formulę (2.12 pav.):

$$S_{gp,ini} = \frac{M}{\varphi_{gp}} = \frac{M}{\varphi_4 + \varphi_5} = \frac{M}{\frac{M_1 \cdot L_d}{E \cdot I_1} + \frac{V \cdot L_d^2}{2 \cdot E \cdot I_1}} = \frac{M}{\frac{2 \cdot M_1 \cdot L_d + V \cdot L_d^2}{2 \cdot E \cdot I_1}}, \quad (2.19)$$

čia L_d – atstumas nuo sijos varžtų grupės sukimosi centro iki kolonos varžtų grupės pirmosios vertikaliosios varžtų eilės; I_1 – mazginio lakšto inercijos momentas; V – nuo siją veikiančios apkrovos atsiradusi skersinė jėga, veikianti sijos varžtų grupę; M_1 ir M – lenkiamieji momentai, veikiantys atitinkamai sijos varžtų grupę ir kolonos varžtų grupę.

Šiame poskyryje taikomos plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų varžtų grupių aktyvių komponentų standžio koeficientų išraiškos pagal LST EN 1993-1-8 (2007) standartą, skirtą plieninėms konstrukcijoms skaičiuoti, kai jungiamųjų elementų storis yra ne mažesnis nei 4 mm.

Glemžimo veikiamų varžtų standžio koeficientai k_{12a} ir k_{12b} apskaičiuoti pagal LST EN 1993-1-8 (2007) 6.11 lentelę:

$$k_{12a} = \frac{24 \cdot n_b \cdot k_b \cdot k_t \cdot d \cdot f_u}{E}, \quad (2.20)$$

$$k_{12b} = \frac{24 \cdot n_b \cdot k_b \cdot k_t \cdot d \cdot f_u}{E}, \quad (2.21)$$

čia $k_b = k_{b1}$, bet $k_b \leq k_{b2}$; $k_{b1} = \frac{0,25 \cdot e_b}{d} + 0,5$, bet $k_{b1} \leq 1,25$; $k_{b2} = \frac{0,25 \cdot p_b}{d} + 0,375$, bet $k_{b2} \leq 1,25$; $k_t = \frac{1,5 \cdot t_j}{d_{M16}}$, bet $k_t < 2,5$. e_b – atstumas nuo varžtų eilės iki laisvo plokštelės krašto apkrovos perdavimo kryptimi; f_u – plieno, kuriame tvirtinamas varžtas, tempiamoji stiprio riba; p_b – tarpai tarp varžtų eilių apkrovos perdavimo kryptimi; t_j – t -ojo komponento storis; n_b – kirpimo veikiamų varžtų eilių skaičius; d_{M16} – M16 varžto vardinis skersmuo; E – plieno tamprumo modulis; d – varžto skersmuo.

Kirpimo veikiamų neįtemptų varžtų standžio koeficientas k_{11} apskaičiuotas pagal LST EN 1993-1-8 (2005) 2.11 lentelę:

$$k_{11} = \frac{16 \cdot n_b \cdot d^2 \cdot f_{ub}}{E \cdot d_{M16}}, \quad (2.22)$$

čia n_b – kirpimo veikiamų varžtų eilių skaičius; d – varžto skersmuo; f_{ub} – varžto plieno tempiamoji stiprio riba; E – plieno tamprumo modulis; d_{M16} – M16 varžto vardinis skersmuo.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasiūlytas trijų spyruoklių metodas gali būti taikomas plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų pradiniam sukamajam standžiui $S_{j,ini}$ skaičiuoti, kuris jungia sijos varžtų grupės pradinį sukamąjį standį, $S_{bbg,ini}$, kolonos varžtų grupės pradinį sukamąjį standį $S_{cbg,ini}$ ir mazginio lakšto pradinį sukamąjį standį $S_{gp,ini}$.
2. Pagal mazginį lakštą veikiančias įrašas sudaryta pradinio sukamojo standžio $S_{gp,ini}$ teoriniams skaičiavimams skirta metodika, taikoma stačiakampio ir T formos mazginiams lakštams. Ji leidžia įvertinti sijos varžtų grupę veikiantį lenkiamąjį momentą, mazginį lakštą veikiantį lenkiamąjį momentą ir skersinę jėgą.
3. Sudarytas sijos ir kolonos varžtų grupių mechaninis modelis, kuris skirtas skaičiuoti varžtų grupių sukamąjį standį ir įvertina deformacijas atsiradusias dėl plieninių šaltai lankstytų elementų ir mazginio lakšto glemžimo ir varžtų kirpimo. Todėl plieninių šaltai lankstytų elementų varžtiniams mazgams skaičiuoti pritaikyti glemžiamųjų ir kerpamųjų varžtų standžio koeficientai k_{12} ir k_{11} , bet šie koeficientai LST EN 1993-1-8 (2007) standarte nėra pritaikyti plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamajam standžiui nustatyti.

4. Teoriniams mazginio lakšto laikomosios galios $M_{gp,Rd}$ skaičiavimams pasiūlyta metodika remiasi prielaida, kad mazgas deformuosis tik plokštumoje ir mazginiame lakšte atsiras plastinis lankstas. Sudarytos formulės, kai vertikaliojoje varžtų eilėje yra du arba trys varžtai.
5. Pateiktos skirtingos M/φ kreivės įvertina skirtingus mazgo irties pobūdžius. Vienos tiesės kreivės modelis pritaikytas kai mazgo irtis vyksta dėl varžtų kirpimo, šaltai lankstytų plieninių elementų vietinės klupties ir plieninių šaltai lankstytų elementų bei mazginio lakšto glemžimo varžtais, o trijų tiesių kreivės modelis pritaikytas kai irtis vyksta dėl mazginio lakšto plieno patekėjimo.

Eksperimentiniai tyrimai ir palyginimas su teoriniais rezultatais

Šiame skyriuje pateikiama disertaciniame darbe analizuojamo pusiau standžių varžtinių mazgų laboratorinių tyrimų metodika, taip pat šių tyrimų rezultatai, modeliavimo baigtiniais elementais metodika ir modeliavimo rezultatai. Taip pat pateikiamas rezultatų, taikant komponentų metodą su laboratorinių tyrimų ir modeliavimo baigtiniais elementais, palyginimas. Skyriuje apibūdinami mazgų irties pobūdžiai, laikomosios galios skaitinės vertės, sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginio lakšto ir viso mazgo M/φ kreivės.

Skyriaus tematika paskelbtos penkios mokslinės publikacijos (Bučmys 2013; Bučmys *et al.* 2014, 2018; Bučmys ir Daniūnas 2015a, 2017a).

3.1. Pusiau standžių mazgų laboratoriniai tyrimai

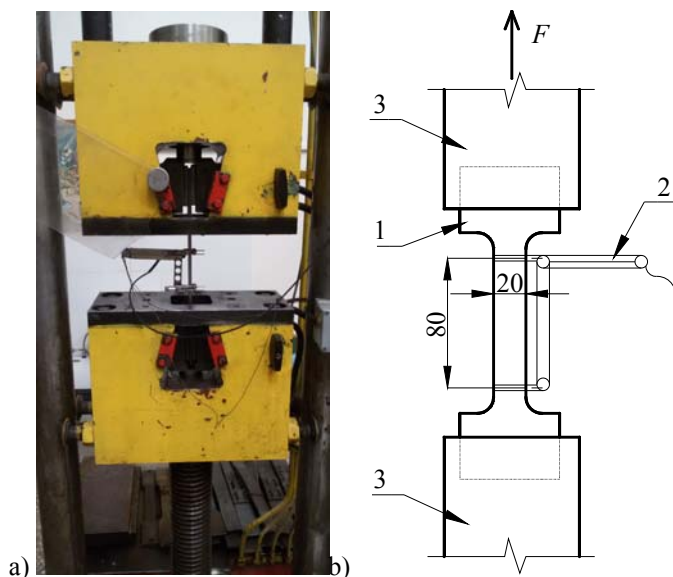
Poskyryje pateikiama disertaciniame darbe analizuojamų pusiau standžių varžtinių mazgų laboratorinių tyrimų metodika, taip pat šių tyrimų rezultatai. Mazgai apkraunami statine apkrova kaip sijos ir kolonos elementų jungtys. Naudojami

stačiakampio formos ir T formos mazginiai lakštai. Atliekamas lenkimo laboratorinis bandymas – gembės galas apkraunamas sutelktąja jėga, taip mazgai yra veikiami lenkiamojo momento.

Atlikus mazgų laboratorinius tyrimus, atliekami mazginių lakštų plieno fizinių ir mechaninių savybių tyrimai, kurių duomenys skirti modeliuoti baigtinių elementų metodu. Mazgų laboratorinių tyrimų duomenys panaudoti kuriant teorinę skaičiavimo metodiką.

3.1.1. Plieninių šaltai lankstytų elementų ir mazginių lakštų plieno fizinių ir mechaninių savybių tyrimas

Plieninių šaltai lankstytų elementų plieno stiprio pagal takumą ir stiprumą vertės buvo imtos remiantis gamintojų atliktais bandymais. Mazginių lakštų plieno stipris nebuvo žinomas, todėl buvo atliekami laboratoriniai bandymai Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybinių konstrukcijų ir geotechnikos laboratorijoje. Mazginiai lakštai, kurių storis 12 mm, buvo pagaminti kitoje partijoje, nei kiti 6, 8 ir 10 mm storio mazginiai lakštai. Todėl šių dviejų partijų mazginių lakštų plieno stipris buvo imtas skirtingas.



3.1 pav. Pieno stiprio pagal takumą ir stiprumą bandymo bendras vaizdas (a) ir schema (b): 1 – plieninis bandinys; 2 – poslinkių matavimo jutiklis; 3 – presas
Fig. 3.1. General view of steel strength investigation (a) and scheme (b): 1 – steel specimen; 2 – displacement indicators; 3 – press

Atlikus laboratorinius bandymus, iš mazginių lakštų vietų, kuriose buvo tik tampriosios deformacijos, buvo išpjauti bandiniai plieno stipriui nustatyti pagal takumo ir stiprumo ribą remiantis LST EN ISO 6892-1:2009 standartu. Išpjauti bandiniai buvo tiriami atliekant tempimo bandymą (3.1 pav.). Tempiamosioms savybėms analizuoti buvo naudojami ilgi ir siauri bandiniai, taip užtikrinant vieną įtempį būvį. Pagal jėgos ir pailgėjimo kreivę nubraižoma įtempių ir santykinų deformacijų kreivė. Ši kreivė atitinka apkrovos ir pailgėjimo kreivę, nes įtempis yra proporcingas jėgai, o deformacija – pailgėjimui. Pagal kreivę nustatomos stiprių vertės.

Įtempių ir apkrovos priklausomybė:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.1)$$

čia σ – įtempiai; F – apkrova; A – skerspjūvio plotas.

Deformacijų ir pailgėjimo priklausomybė:

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0}, \quad (3.2)$$

čia ε – santykinės deformacijos; L_i – matavimo bazės ilgis apkrovus bandinį jėga; L_0 – pradinis matavimo bazės ilgis.

Stiprių vertės buvo rastos iš inžinerinės įtempių ir deformacijų kreivės. Esant pradinei stadijai, inžinerinė ir tikroji įtempių kreivės praktiškai sutampa, tačiau nesutapimas pradeda ryškėti peržengus takumo ribą.

3.1 lentelė. Laboratoriniais bandymais nustatytos plieno stiprio savybės

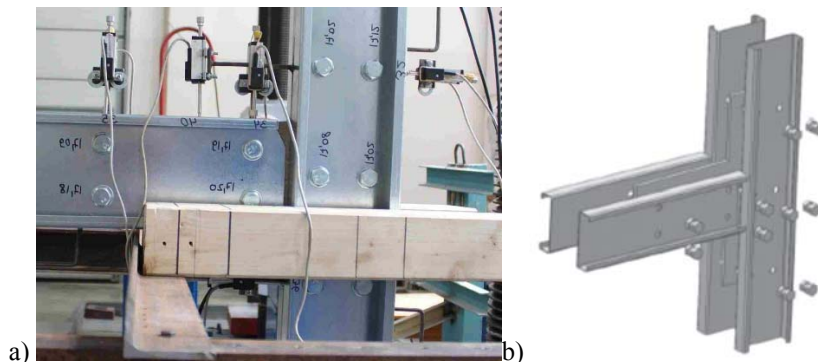
Table 3.1. Laboratory values of steel strength properties

Mazgo dalis	f_y , MPa	f_u , MPa
Plieniniai šaltai lankstyti elementai	380	484
12 mm storio mazginis lakštas	442	570
6, 8, 10 mm storio mazginis lakštas	360	540

Laboratorinių bandymų metu gautos plieno fizinių ir mechaninių savybių vidutinės vertės pateiktos 3.1 lentelėje. Plieninių šaltai lankstytų elementų plieno stipris pagal takumo ribą $f_y = 380$ MPa, stipris pagal stiprumo ribą $f_u = 484$ MPa. 12 mm storio mazginio lakšto $f_y = 442$ MPa, o $f_u = 570$ MPa. 6, 8, 10 mm storio mazginių lakštų $f_y = 360$ MPa, o $f_u = 540$ MPa.

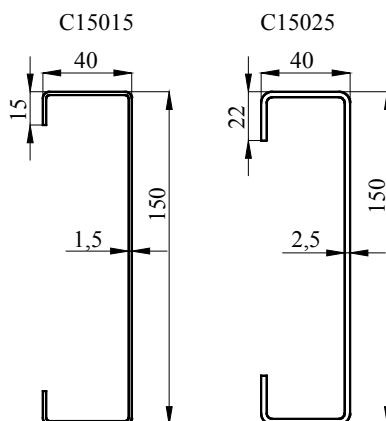
3.1.2. Bandiniai ir naudojamos medžiagos

Laboratoriškai ištirti aštuoni sijos ir kolonos varžtiniai mazgai. Sumontuotas ir laboratoriniam tyrimui parengtas mazgas parodytas 3.2 a paveiksle, o bandinio sąrankos 3D modelis – 3.2 b paveiksle. Sijos ir kolonos varžtinių mazgų bandiniai buvo pagaminti iš plieninių šaltai lankstyčių C formos elementų, mazginio lakšto, varžtų ir intarpų (3.2 lentelė).



3.2 pav. Laboratoriniam bandymui paruoštas mazgas: a) bendras vaizdas; b) bandinio sąrankos 3D modelis

Fig. 3.2. Joint specimen for laboratory investigation: a) general view; b) 3D model of the specimen



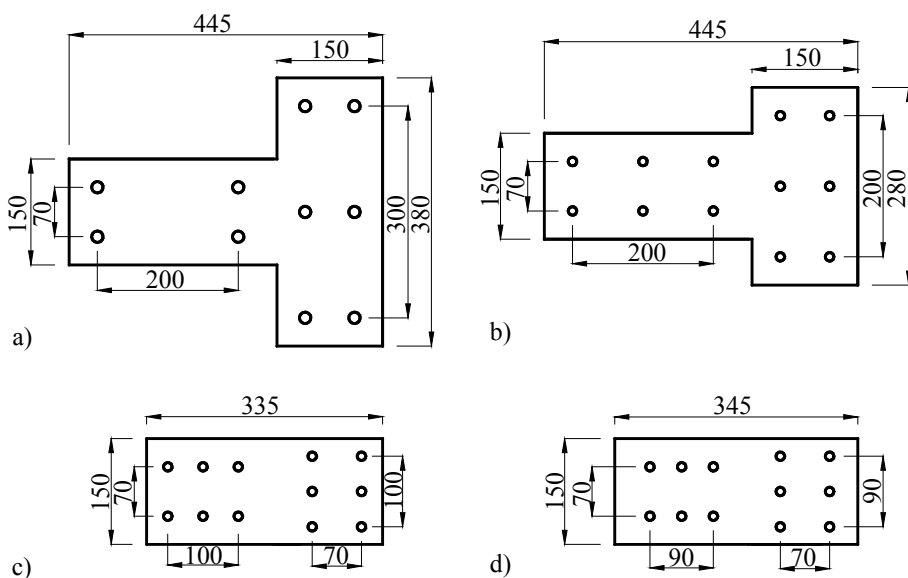
3.3 pav. Laboratoriniam bandymui naudoti plieninių šaltai lankstyčių elementų matmenys

Fig. 3.3. Cross section of the cold formed steel specimens for laboratory investigation

3.2 lentelė. Parinkti bandinių varžtų skersmenys, mazginio lakšto forma ir storis

Table 3.2. Bolt diameter, gusset plate form and thickness of specimens

Bandinys	Varžto skersmuo	Mazginio lakšto forma	Mazginio lakšto storis	Elemento sienelės storis
M12C15015T12	12	T	12	1,5
M12C15025T12	12	T	12	2,5
M16C15015T12	16	T	12	1,5
M16C15025T8	16	T	8	2,5
M16C15025T6	16	T	6	2,5
M12C15025T6	12	T	6	2,5
M12C15025I10	12	Stačiakampio	10	2,5
M12C15025I8	12	Stačiakampio	8	2,5

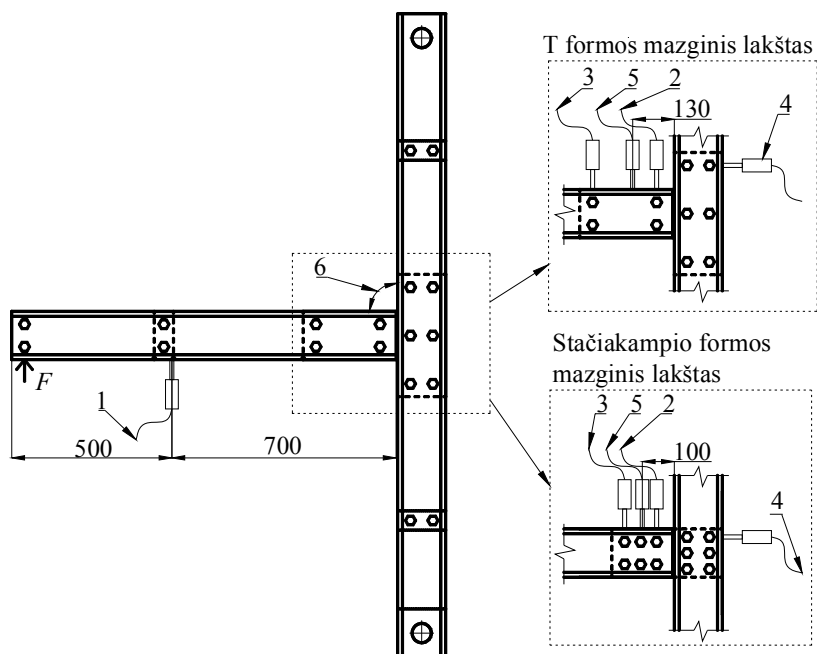


3.4 pav. Laboratoriniams bandymams naudotų bandinių mazginių lakštų formos:

a) M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025 T8 ir M16 C15025 T6; b) M12 C15025 T6; c) M12 C15025 I10; d) M12 C15025 I8

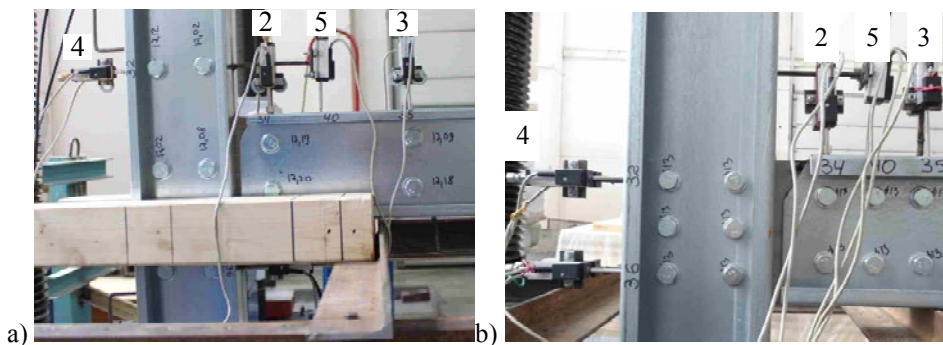
Fig. 3.4. Gusset plates of specimens under laboratory investigation: a) M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025 T8 ir M16 C15025 T6; b) M12 C15025 T6; c) M12 C15025 I10; d) M12 C15025 I8

Bandiniams naudoti C formos elementai buvo 150 mm aukščio, o sienelės storis – 1,5 mm ir 2,5 mm (3.3 pav.). Plieniniai šaltai lankstyti elementai pagaminti iš S350GD+Z klasės cinkuotojo plieno pagal EN 10326:2004 standartą. Sija ir kolona sujungtos mazginiais lakštais (3.4 pav.), kurie buvo dviejų formų: T ir stačiakampio formos. Mazginiai lakštai ir sijos bei kolonos elementų tarpai pagaminti iš S355 klasės plieno pagal LST EN 10025-2:2005 standartą. Mazginiai lakštai prie elementų prijungti M12 arba M16 varžtais, kurie yra 8.8 klasės pagal LST EN ISO 4017 standartą. 12 mm ir 16 mm skersmens varžtams parenkamos veržlės ir poveržlės atitinkamai pagal LST EN ISO 4032 ir LST EN ISO 7089:2002 standartus. Sijos elementai prie mazginio lakšto tvirtinami keturiais arba šešiais varžtais, atstumas tarp vertikaliųjų eilių atitinkamai yra 200 mm arba 100, 50, 45 mm. Tarp horizontaliųjų eilių šioje varžtų grupėje atstumas vienodas – 70 mm. Visų bandinių mazginis lakštas prie kolonos elementų tvirtinamas šešiais varžtais. Tarp horizontaliųjų eilių atstumas yra 150, 100, 50 arba 45 mm. Tarp vertikaliųjų eilių šioje varžtų grupėje atstumas vienodas – 70 mm. Įvertinant gamybos netikslumus, skylės varžtams išgręžtos 1 mm didesnės nei varžtų skersmuo, kad būtų įmanoma surinkti bandinius.



3.5 pav. Mazgo poslinkių matavimo jutiklių išdėstymo schema

Fig. 3.5. The layout of displacement indicators



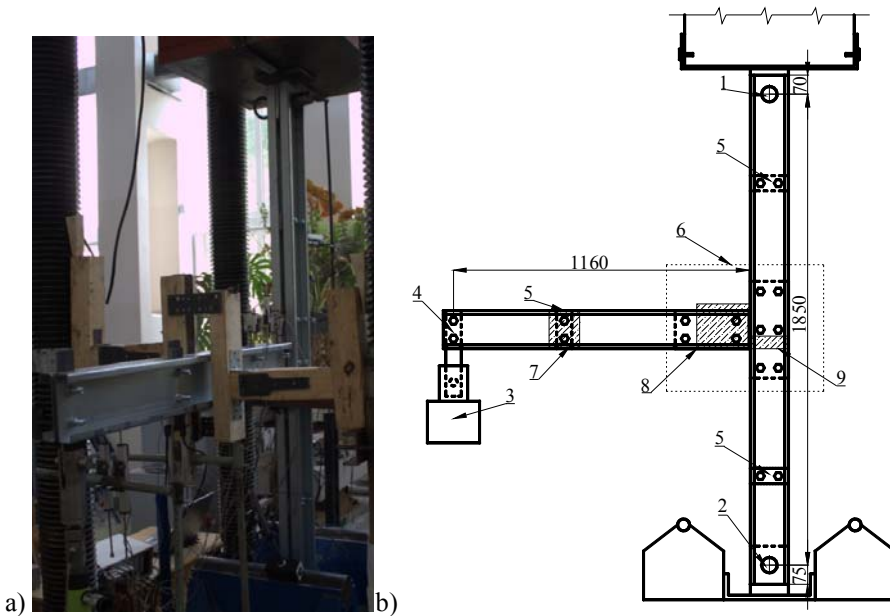
3.6 pav. Poslinkių matavimo jutiklių išdėstymas: a) bandinys su T formos mazginiu lakštu; b) bandinys su stačiakampio formos mazginiu lakštu

Fig. 3.6. The layout of displacement indicators: a) specimen with T form gusset plate; b) specimen with rectangular form gusset plate

Viso bandymo metu sijos ir mazgo poslinkiai matuoti tiesiniais elektroniniais poslinkių jutikliais (3.5, 3.6 pav.). Prieš atliekant bandymą, iš viso sumontuoti penki poslinkių jutikliai. Pirmas jutiklis skirtas sijos vertikaliajam poslinkiui matuoti. Antras ir trečias jutikliai skirti sijos vertikaliajam poslinkiui matuoti mazginio lakšto atžvilgiu, o ketvirtas jutiklis skirtas kolonos horizontaliajam poslinkiui matuoti mazginio lakšto atžvilgiu. Antro–ketvirto jutiklių tvirtinimo strypeliai privirinti prie mazginio lakšto, o patys jutikliai atremiami į plieninius šaltai lankstytus elementus. Penktas jutiklis skirtas mazginio lakšto įlinkiui matuoti. Antro–ketvirto poslinkių jutiklių duomenys buvo naudojami sijos ir kolonos varžtų grupių pasisukimo kampui apskaičiuoti, o penktas jutiklis naudotas mazginio lakšto pasisukimo kampui apskaičiuoti. Viso mazgo pasisukimo kampas buvo matuotas naudojant kampamatį – schemeje tai yra šeštas jutiklis.

3.1.3. Laboratoriniai bandymai statine apkrova

Pusiau standaus varžtinio mazgo laboratoriniai tyrimai atliekami apkraunant mazgą trumpalaikė statine apkrova iki irties. Laboratoriniai bandymai – tai sijos ir kolonos mazgo bandymai naudojant sutelktąją apkrovą gembės gale, tuomet analizuojamam mazgui sukeliamas lenkiamasis momentas. Laboratoriniai tyrimai atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybinių konstrukcijų ir geotechnikos laboratorijoje. Mazgo lenkimo bandymui naudojamas bandymo stendas. Laboratorijoje tiriama mazgo kolona yra lanksčiai atremiama viršuje ir apačioje (3.7 pav.).



3.7 pav. Mazgo laboratorinio bandymo bendras vaizdas (a) ir schema (b): 1 – lanksti kolonos viršaus atrama; 2 – kolonos apačios ritininė atrama (angl. *rolling support*); 3 – domkratas; 4 – apkrovos pridėjimo gembei vieta; 5 – tarpai tarp elementų; 6 – mazgo sritis; 7 – sijos šoninis įtvirtis; 8 – mazginio lakšto šoninis įtvirtis; 9 – kolonos šoninis įtvirtis

Fig. 3.7. General view of joint laboratory investigation (a) and scheme (b): 1 – pinned connection of the top of the column; 2 – rolling support of the bottom of the column; 3 – jack; 4 – load additive point; 5 – gaskets between elements; 6 – joint region; 7 – lateral restraint for beam; 8 – lateral restraint for gusset plate; 9 – lateral restraint for column

Plieniniai šaltai lankstyti elementai yra labai jautrūs šoninei sukamajai klupčiai, o mazgo elgseną siekta tirti plokštumoje, tad buvo naudojami šoniniai įtvirtčiai. Šoniniai įtvirtčiai sumontuoti kolonai, sijai ir mazginiam lakštui, kurie suvaržė mazgo poslinkius iš plokštumos.

3.1.4. Laboratorinių tyrimų duomenų naudojimas sijos ir kolonos varžtų grupių bei mazginio lakšto lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivėms sudaryti

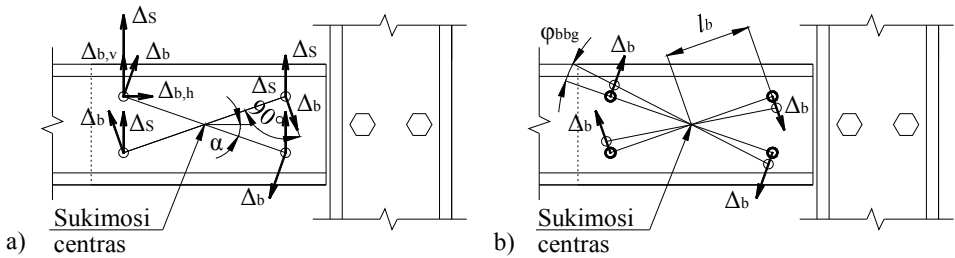
Sijos varžtų grupė, veikiamą apkrovos, pasisuko kampu φ_{bbg} dėl lenkiamojo momento poveikio ir vertikalčiai pasislinko dėl skersinės jėgos. Poslinkių matavimo jutikliai (2 ir 3) buvo skirti sijos varžtų grupės poslinkiams dėl skersinės jėgos ir

lenkiamojo momento poveikio matuoti. Sijos varžtų grupės poslinkis tik dėl lenkiamojo momento buvo perskaičiuotas, iš viso varžtų grupės poslinkio atimant poslinkį dėl skersinės jėgos ir paliekant poslinkį tik dėl lenkiamojo momento pagal šią formulę:

$$\begin{cases} \Delta_2 = \Delta_S + \Delta_{b,v} \\ \Delta_3 = \Delta_{b,v} - \Delta_S \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta_S = \Delta_{b,v} - \Delta_3 \\ \Delta_{b,v} = \frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} \end{cases} \rightarrow \Delta_b = \frac{\Delta_{b,v}}{\cos \alpha}, \quad (3.3)$$

čia Δ_2 – poslinkis, išmatuotas 2 poslinkių matavimo jutiklio; Δ_3 – poslinkis, išmatuotas 3 poslinkių matavimo jutiklio; Δ_S – poslinkis dėl skersinės jėgos; Δ_b – poslinkis dėl lenkiamojo momento; $\Delta_{b,v}$ – vertikalioji poslinkio dėl lenkiamojo momento projekcija; $\Delta_{b,h}$ – horizontalioji poslinkio dėl lenkiamojo momento projekcija.

Sijos varžtų grupės poslinkio schema, pagal kurią sudaryta 3.3 formulė, dėl lenkiamojo momento ir skersinės jėgos poveikio pateikta 3.7 paveiksle, a.



3.8 pav. Sijos varžtų grupės poslinkiai ir pasisukimo kampas: a) sijos varžtų grupės poslinkio dėl veikiančio lenkiamojo momento ir skersinės jėgos schema; b) kampinis posūkis dėl linijinių komponentų poslinkio

Fig. 3.8. Beam bolt group displacement and rotation: a) Beam bolt group displacement from bending moment and shear forces and b) rotation from bending moment

Sijos varžtų grupės pasisukimo kampas apskaičiuojamas taip (3.8 pav., b):

$$\varphi_{bbg} = \frac{\Delta_b}{l_b}, \quad (3.4)$$

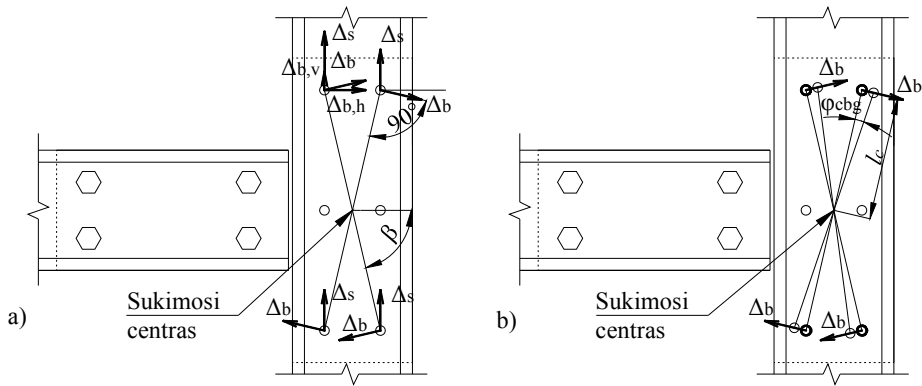
čia Δ_b – poslinkis dėl lenkiamojo momento; l_b – atstumas nuo varžto centro iki sukimosi ašies.

Kolonos varžtų grupės poslinkis dėl veikiančio lenkiamojo momento kolonos varžtų grupėje, atėmus poslinkį dėl skersinės jėgos, apskaičiuojamas pagal šias formules:

$$\Delta_4 = \Delta_{b,h} \rightarrow \Delta_b = \frac{\Delta_{b,h}}{\sin \beta}, \quad (3.5)$$

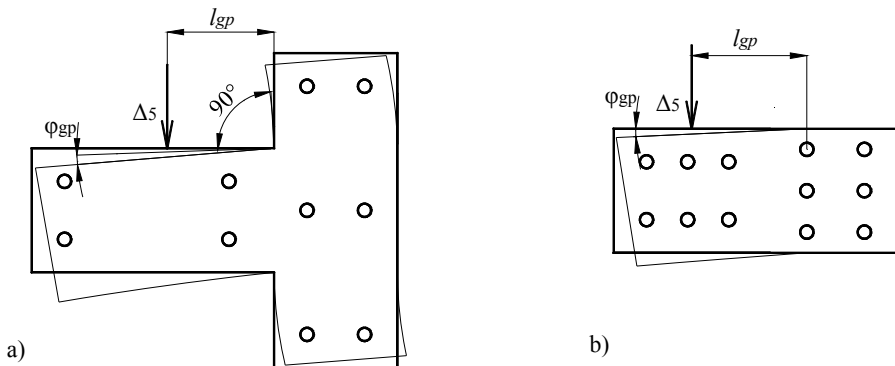
čia Δ_4 – poslinkis, išmatuotas 4 poslinkių matavimo jutiklio; Δ_b – poslinkis dėl lenkiamojo momento; $\Delta_{b,h}$ – horizontalioji poslinkio dėl lenkiamojo momento projekcija.

Kolonos varžtų grupės poslinkiai, pagal kuriuos sudaryta 3.5 formulė, dėl lenkiamojo momento ir skersinės jėgos pateikti 3.9 paveiksluose, a ir b.



3.9 pav. Kolonos varžtų grupės poslinkiai ir kampinis posūkis: a) kolonos varžtų grupės poslinkiai dėl veikiančio lenkiamojo momento ir skersinės jėgos; b) kampinis posūkis dėl lenkiamojo momento

Fig. 3.9. Column bolt group displacement and rotation: a) column bolt group displacement from bending moment and shear forces; b) rotation from bending moment



3.10 pav. Mazginio lakšto pasisukimo kampas: a) T formos; b) stačiakampio formos

Fig. 3.10. The rotation of gusset plate: a) T form; b) rectangular form

Kolonos varžtų grupės pasisukimo kampas apskaičiuojamas taip:

$$\varphi_{cbg} = \frac{\Delta_b}{l_c}, \quad (3.6)$$

čia Δ_b – poslinkis dėl lenkiamojo momento; l_c – atstumas nuo varžto centro iki sukimosi ašies.

Mazginio lakšto pasisukimo kampas (3.10 pav.) dėl lenkiamojo momento ir skersinės jėgos apskaičiuojamos pagal tokią išraišką:

$$\varphi_{gp} = \frac{\Delta_5}{l_{gp}}, \quad (3.7)$$

čia Δ_5 – poslinkis, išmatuotas 5 poslinkių matavimo jutiklio; l_{gp} – poslinkių matavimo jutikliui tvirtinti skirto strypo ilgis.

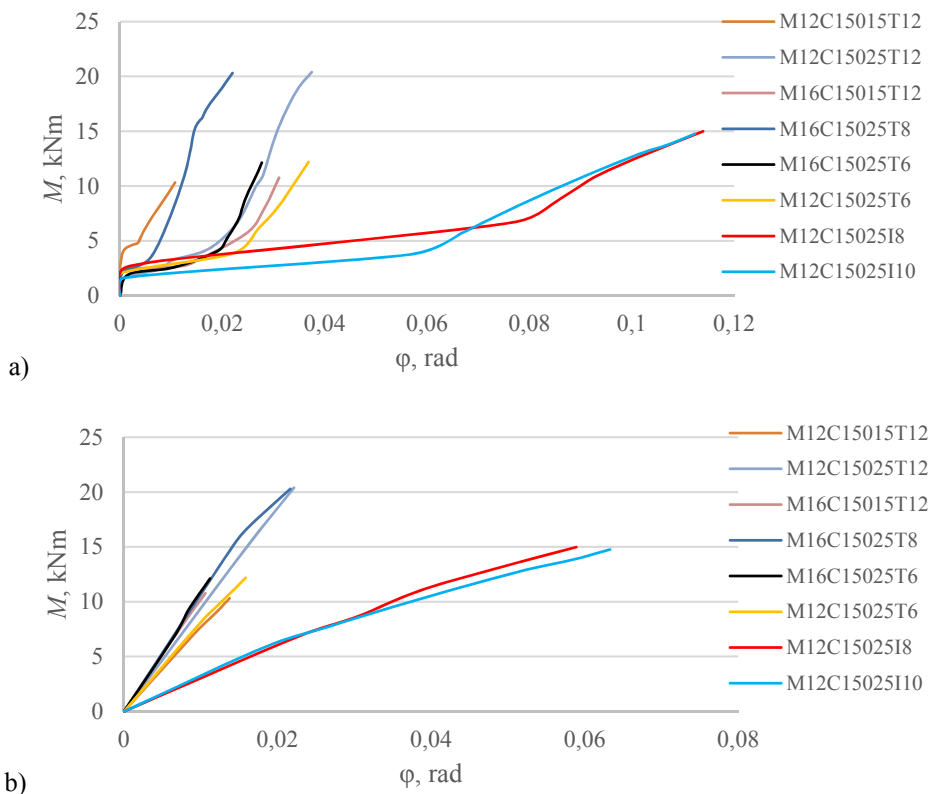
3.1.5. Pusiau standžių varžtinių mazgų laboratorinių tyrimų rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami laboratorinių tyrimų rezultatai: laikomosios galios, pusiau standaus varžtinio mazgo, sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginio lakšto pradiniai sukamieji standžiai, gembės įlinkiai. Aptariamas mazgo laboratorinis irties pobūdis. Poskyrio pabaigoje pateikiami mazginio lakšto fizinių ir mechaninių savybių tyrimų rezultatai.

Kaip minėta anksčiau, sijos varžtų grupės M/φ kreivės buvo apskaičiuotos iš 2 ir 3 poslinkių jutiklių duomenų ir pateiktos 3.11 a paveiksle. 3.11 b paveiksle grafikai pateikti atmetus pradinį varžtų grupės praslydimą, kuris susidarė dėl to, kad varžtų skersmuo mažesnis už jiems skirtų skylių skersmenis. Praslydimo dydžiui įtakos turi pradinė varžtų padėtis jiems skirtos skylės atžvilgiu ir varžtų gręžimo technologiniai nuokrypiai. Ties kokia apkrova įvyks praslydimas, priklauso nuo varžto užveržimo jėgos ir trinties jėgų tarp mazginio lakšto ir plieninių šaltai lankstytų elementų. Šis praslydimas nevertinamas projektavimo metodikose, nes kol konstrukcijos montuojamos, varžtiniuose mazguose įvyksta praslydimas dėl savojo konstrukcijų svorio, todėl tai neturi jokios įtakos mazgo sukamajam standžiui ir konstrukcijų elgsenai. Dėl šios priežasties praslydimas nevertinamas komponentų metodu, kuris aprašytas antrame skyriuje.

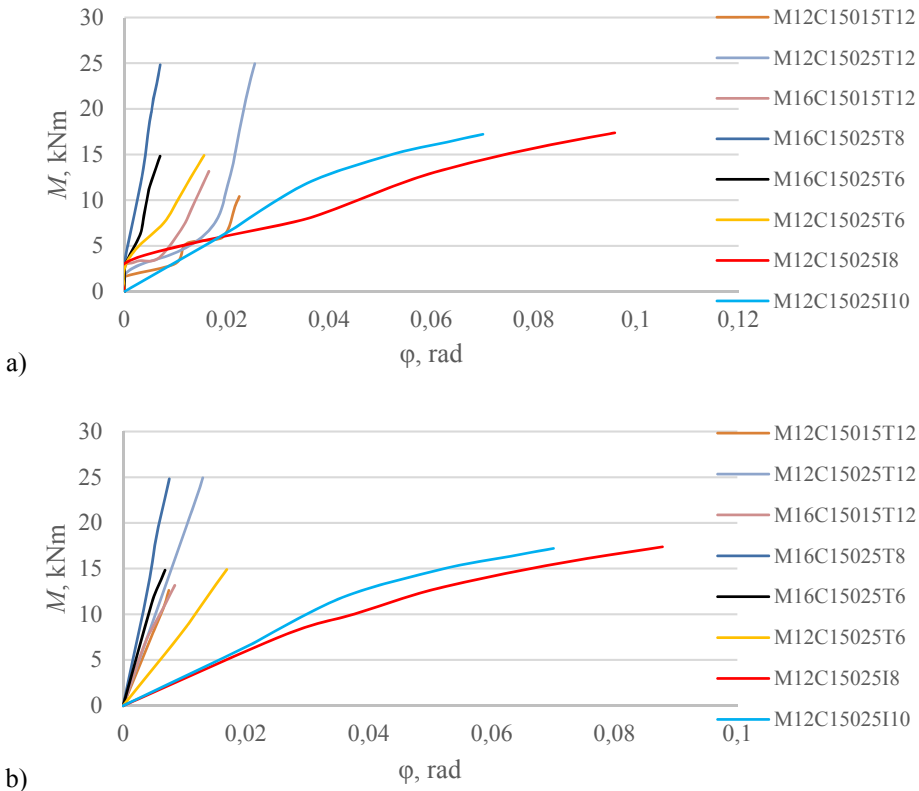
Sijos varžtų grupės M/φ grafike labai išsiskiria M12C15025I8 ir M12C15025I10 bandinių sijos varžtų grupių didelis pasisukimas, kuris yra atitinkamai 0,05889 rad ir 0,06331 rad. Šių bandinių pradinis sukamasis standis atitinkamai yra 301,79 MNm/rad ir 321,29 MNm/rad. Nors elementų matmenys mažai skiriasi nuo kitų bandinių, tačiau atstumas tarp varžtų eilių yra perpus mažesnis. Tai ir turi didžiausią įtaką šios mazgo dalies pradiniam sukamajam standžiui. Matyti, kad lenkiamojo momento ir posūkio priklausomybė nėra tiesės tipo. Sukama-

sis standis mažėja ties 11,03 kNm ir 10,53 kNm lenkiamuoju momentu. Kitų bandinių pradinis sukamasis standis didesnis daugiau nei du kartus, todėl apskaičiuotas posūkis perpus mažesnis. Iš kitų bandinių didžiausias posūkis ir mažiausias pradinis sukamasis standis yra bandinių M12C15015T12, M12C15025T6, M12C15025T12, kurių posūkis atitinkamai 0,01375 rad, 0,01584 rad ir 0,02212 rad, pradinis sukamasis standis atitinkamai 773,95 MNm/rad, 814,43 MNm/rad ir 940,03 MNm/rad. Taip yra todėl, kad šių bandinių varžto skersmuo yra 12 mm ir mažesnis, lyginant su likusiais bandiniais, kurių varžto skersmuo – 16 mm. Likusių bandinių M16C15015T12, M16C15025T6 ir M16C15025T8 pradinis sukamasis standis atitinkamai yra 1037,25 MNm/rad, 1046,19 MNm/rad ir 1064,19 MNm/rad, o pasisukimas atitinkamai 0,01059 rad, 0,01121 rad ir 0,02167 rad.



3.11 pav. Laboratoriniais bandymais analizuojamų sijos varžtų grupių M/φ kreivės: a) su praslydimu; b) be praslydimo

Fig. 3.11. Beam bolt group experimental M/φ curves: a) with slipping; b) without slipping

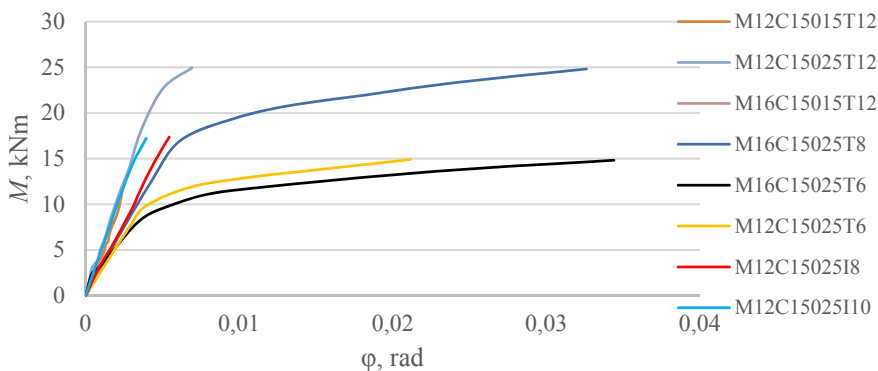


3.12 pav. Laboratoriniais bandymais analizuojamų kolonos varžtų grupių M/φ kreivės:
a) su praslydimu; b) be praslydimo

Fig. 3.12. Column bolt group laboratory M/φ curves: a) with slipping;
b) without slipping

3.12 a paveiksle pavaizduotos visų bandinių kolonos varžtų grupės M/φ kreivės, apskaičiuotos naudojant 4 ir 6 jutiklių rodmenis, o 3.12 b paveiksle pateiktos kreivės atmetus praslydimą. Kaip ir sijos varžtų grupių atveju, grafike labai išsiskiria M12C15025I8 ir M12C15025I10 bandinių sijos varžtų grupių mažas sukamasis standis. Šių bandinių pasisukimas atitinkamai yra 0,08781 rad ir 0,07006 rad, pradinis sukamasis standis – 301,79 MNm/rad ir 295,73 MNm/rad. Taip yra todėl, kad atstumas tarp varžtų eilių yra mažiausias. Grafike matyti, kad šių bandinių M/φ grafikuose sukamasis standis sumažėja atitinkamai ties

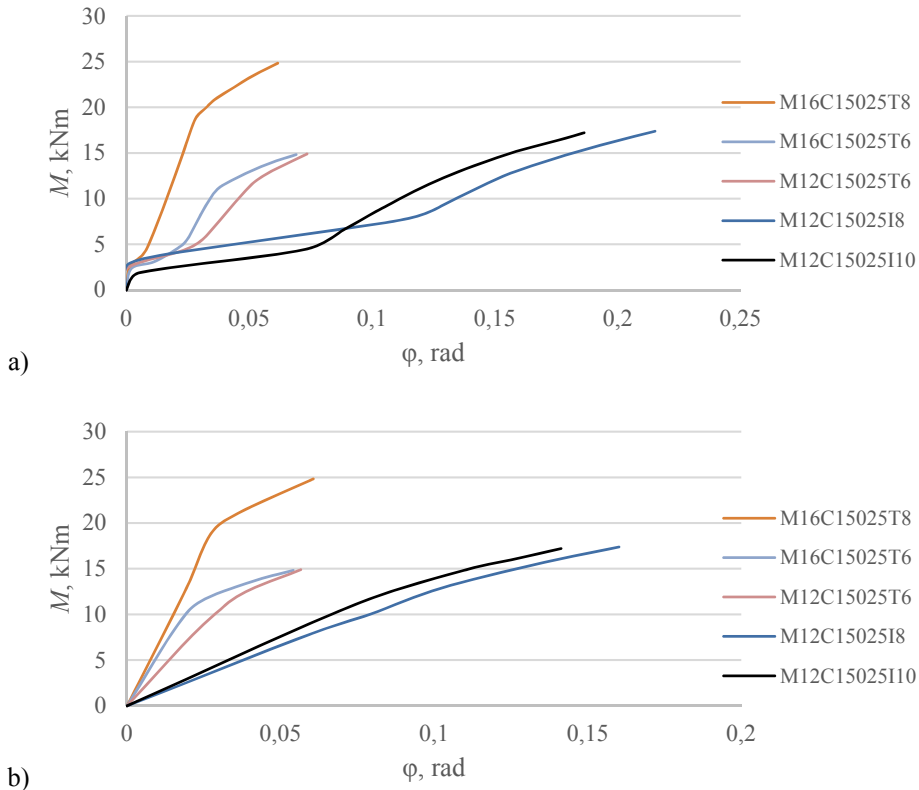
12,79 kNm ir 12,26 kNm lenkiamuoju momentu. Tai gali būti paaiškinama pasireiškiančia plastine deformacija ties glemžiamą plieninių šaltai lankstytų elementų sienele. Taip pat išsiskiria M12C15025T6 bandinio grafikas, kuriame pasisukimas yra 0,01687 rad, pradinis sukamasis standis – 834,99 MNm/rad. Šio bandinio atstumas tarp išorinių varžtų yra mažesnis už likusių bandinių. Kitų bandinių, kurių varžto skersmuo 12 mm, M12C15015T12 ir M12C15025T12 pasisukimas – 0,00744 rad ir 0,01298 rad, pradinis sukamasis standis atitinkamai 1639,6 MNm/rad ir 1906,64 MNm/rad. Standžiausios kolonos varžtų grupės buvo bandinių, kurių varžtų skersmuo 16 mm: M16C15015T12, M16C15025T6 ir M16C15025T8, o pasisukimai atitinkamai 0,00841 rad, 0,00684 rad, 0,00752 rad, pradinis sukamasis standis atitinkamai 1921,94 MNm/rad, 2400,57 MNm/rad ir 3185,44 MNm/rad.



3.13 pav. Laboratoriniais bandymais analizuojamų mazginių lakštų M/ϕ kreivės
Fig. 3.13. Gusset plate bolt group experimental M/ϕ curves

Toliau pateikti (3.13 pav.) mazginio lakšto poslinkių ir lenkiamojo momento priklausomybės grafikai, kurie buvo apskaičiuoti panaudojus 5 poslinkių jutiklio duomenis. Mažiausias pradinis sukamasis standis yra bandinių, kurių mazginio lakšto storis – 6 mm, M16C15025T6 ir M12C1025T6, kurių pasisukimas – 0,03440 rad ir 0,02115 rad, o pradinis sukamasis standis atitinkamai 2563,86 MNm/rad ir 2638,23 MNm/rad. Toliau standesni M16C15025T8 ir M12C15025I8 bandiniai, kurių sienelės storis 8 mm, pasisukimas 0,03262 rad ir 0,00545 rad, pradinis sukamasis standis atitinkamai 2924,30 MNm/rad ir 3106,50 MNm/rad. Kiti standesni 10 mm ir 12 mm mazginiai lakštai M12C15025I10, M16C15015T12, M12C15025T12 ir M12C15015T12, kurių pasisukimai atitinkamai 0,00394 rad, 0,00270 rad, 0,00693 rad, 0,00253 rad, o pradinis sukamasis standis atitinkamai 2435,59 kNm/rad, 4857,67 kNm/rad, 4915,90 kNm/rad ir 4557,15 kNm/rad. Bandinių M16C15025T6, M12C15025T6,

M16C15025T8 ir M12C15025T12 pastebimas netiesiškumas ir sukamojo standžio mažėjimas, nes grafikai linksta ties lenkiamuoju momentu, kuris atitinkamai yra 11,39 kNm, 12,34 kNm, 18,62 kNm, 22,74 kNm.



3.14 pav. Laboratoriniais bandymais analizuojamų mazgų M/φ kreivės:

a) su praslydimu; b) be praslydimu

Fig. 3.14. Joint laboratory M/φ curves: a) with slipping; b) without slipping

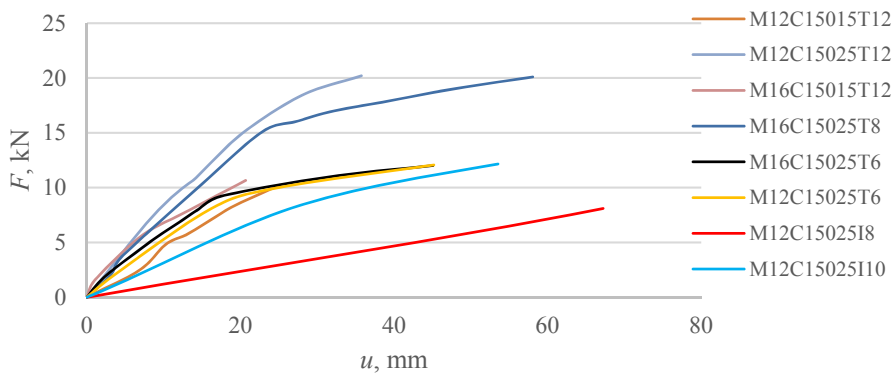
3.14 a paveiksle pateiktos M16 C15025 T8, M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8, M12 C15025 I10 bandinių mazgo M/φ kreivės, o 3.14 b paveiksle pateiktos kreivės be praslydimu. Mažiausias pradinis sukamasis standis yra M12C15025I8 ir M12C15025I10 bandinių, mazgas pasisuko atitinkamai 0,16016 rad ir 0,14132 rad, o pradinis sukamasis standis 131,70 kNm/rad ir 139,43 kNm/rad. Pastebimas šių bandinių sukamojo standžio sumažėjimas atitinkamai ties 12,79 kNm ir 12,26 kNm lenkiamuoju momentu. Kitų bandinių M12C15025T6, M16C15025T6 ir M16C15025T8 posūčiai atitinkamai yra

0,05657 rad, 0,05409 rad ir 0,06061 rad, o pradinis sukamasis standis atitinkamai 364,28 kNm/rad, 540,48 kNm/rad ir 665,63 kNm/rad. Taip pat pastebimas sukamojo standžio mažėjimas atitinkamai ties 12,34 kNm, 11,39 kNm, 18,62 kNm lenkiamuoju momentu.

3.3 lentelė. Laboratorinės laikomosios galios ir pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės

Table 3.3. Laboratory bending moment resistance and initial rotational stiffness values

Bandinys	$M_{j,R,exp}$, kNm	$S_{bbg,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{cbg,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{gp,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{j,ini,exp}$, kNm/rad
M12C15015T12	12,62	773,95	1639,60	4557,15	–
M12C15025T12	24,95	940,03	1906,64	4915,90	–
M16C15015T12	13,17	1037,25	1921,94	4857,67	–
M16C15025T8	17,16	1064,19	3185,44	2924,30	665,63
M16C15025T6	11,39	1046,93	2400,57	2563,86	540,48
M12C15025T6	12,34	814,43	834,99	2638,23	364,28
M12C15025I8	17,38	301,79	301,79	3106,50	131,70
M12C15025I10	17,22	321,29	295,73	4435,59	139,43



3.15 pav. Laboratoriniais bandymais analizuojamų bandinių gembų įlinkiai
Fig. 3.15. Deflection of cantilever under experimental investigation

3.3 lentelėje pateiktos laboratoriniais bandymais gautos mazgo laikomosios galios, sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginių lakštų ir mazgo pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės.



3.16 pav. M12C15025I10 bandinio laboratoriniai gembės įlinkiai didesni už naudotų įlinkiamačių ribines reikšmes

Fig. 3.16. Laboratory deflection of cantilever of M12C15025I10 specimen is bigger than displacement transducer maximum values

3.15 paveiksle pateiktos apkrovos ir gembės įlinkių kreivės. Kreivės gautos iš 1 jutiklio, sumontuoto 500 mm atstumu nuo gembės galo. Matuojant M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10 bandinių gembės įlinkius, buvo viršyta įlinkiamačių eiga (3.16 pav.), todėl įlinkis išmatuotas ne iki bandinių irties apkrovos. Didžiausi poslinkiai išmatuoti M12C15025I8, M16C15025T8 ir M12C15025I10, kurie atitinkamai yra 67,23 mm, 58,06 mm, 53,54 mm. Mažesni poslinkiai išmatuoti M16C15025T6, M12C15025T6 ir M12C15025T12 bandinių, kurie atitinkamai yra 45,18 mm, 45,05 mm ir 35,74 mm. Mažiausi poslinkiai išmatuoti M12C15015T12 ir M16C15015T12, kurie atitinkamai yra 25,08 mm ir 20,67 mm.

Atliekant laboratorinius tyrimus bandiniai buvo bandomi iki mazgo irties. Plokštumoje analizuojamo mazgo galimi irties pobūdžiai:

- sijos arba kolonos elementų sienelių glemžimas;
- varžtų kirpimas – kiekvienas varžtas kerpamas dviejose plokštumose;
- sijos arba kolonos elementų irtis – vietinis elementų klupimas didžiausio veikiamo lenkiamojo momento vietoje;
- mazginio lakšto ties varžtais glemžimas;
- mazginio lakšto irtis dėl veikiančio lenkiamojo momento.



3.17 pav. Bandinių irties pobūdis atliekant laboratorinius tyrimus: a) sijos elementų vietinė kluptis; b) mazginio lakšto patekėjimas; c) elementų sienelės glemžimas
Fig. 3.17. Laboratory investigation failure modes of the specimens: a) local buckling of cold-formed elements; b) yielding of gusset plate; c) bearing of cold-formed elements

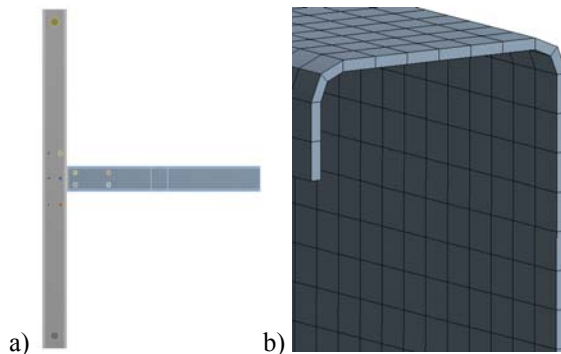
Bandiniai buvo parinkti taip, kad suirtų keliais skirtingais būdais: mazginio lakšto irtis, sijos elementų vietinė kluptis ir elementų sienelių glemžimas (3.17 pav.). Vietinė kluptis pasireiškė M12C15015T12 ir M16C15015T12 ir M12C15025T12 bandiniuose. Sija išklupo ties mažiausiai nuo gembės galo nuto-lusioje vertikalioje varžtų eilėje – šioje vietoje didžiausias lenkiamasis momentas, veikiantis sijoje. M16C15025T8, M16C15025T6 ir M12C15025T6 bandinių irties pobūdis buvo mazginio lakšto irtis dėl lenkiamojo momento. Pastebėta, kad mazginio lakšto gniuždomojoje zonoje įvyko vietinė kluptis. Pagal sudarytas mazginio lakšto M/φ kreives galima teigti, kad šiame lakšte vyko plastinės deformacijos. M12C15025I8 ir M12C15025I10 bandinių irties pobūdis – kolonos elementų sienelės glemžimas.

3.2. Tiriamų mazgų modeliavimas baigtinių elementų metodu

Šiame poskyryje pusiau standi varžtinė jungtis analizuojama baigtinių elementų metodu. Analizė atliekama standartiniu baigtinių elementų paketu ANSYS Workbench. Taikoma netiesinė analizė, įvertinant plieno fizines ir mechanines savybes pagal atliktus laboratorinius tyrimus. Norint pagreitinoti skaičiavimą, naudojamos simetrijos sąlygos – modeliuojama pusė bandinio. Modeliavimo tikslas – gauti realią mazgo elgseną atitinkantį tūrinį modelį, kuriuo būtų galima nustatyti mazgo laikomąją galią, mazgo, varžtų grupių ir mazginio lakšto pradinį sukamąjį standį. Poskyrio pabaigoje pateikiami skirtingų baigtinių elementų modelių, atitinkančių laboratorinių tyrimų bandinius, skaičiavimo rezultatai.

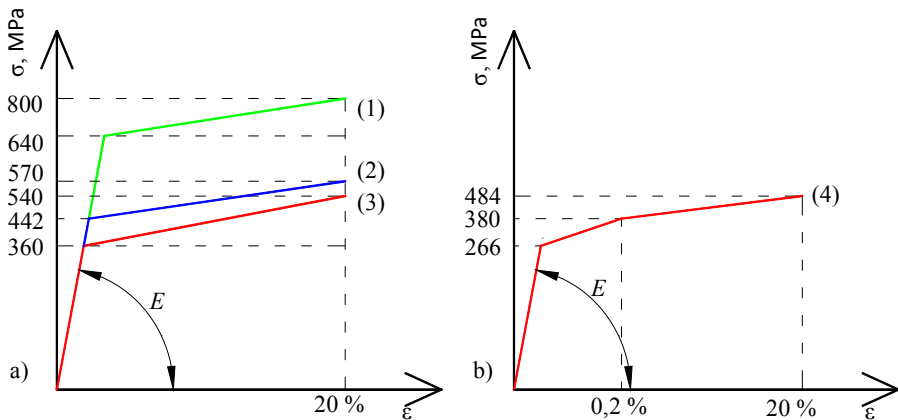
3.2.1. Tiriamų mazgų baigtinių elementų modeliai

Baigtinių elementų metodas gali būti plačiai taikomas pusiau standžių mazgų elgsenos tyrimams. Šiuo metodu gali būti įvertinamas medžiagos fizinis ir geometrinis netiesiškumas, kraštinės sąlygos, sąlyčio paviršių elgsena. Šio metodo privalumas – mažos materialinės sąnaudos, lyginant su laboratoriniais tyrimais, ir universalumas, didelė įvairovė programiniuose paketuose siūlomų priemonių, leidžiančių aprašyti įvairius geometrijos uždavinius. Tačiau šis metodas turi ir trūkumų – metodo tikslumui turi įtakos baigtinių elementų tipo parinkimas, baigtinių elementų tinklelio dydis, o sprendinio gavimo greičiui – kompiuterių technikos galinumas.



3.18 pav. Pusiau standaus varžtinio mazgo: a) erdvinis baigtinių elementų modelis; b) baigtinių elementų tinklelis

Fig. 3.18. Semi-rigid bolted connection: a) 3D finite element model; b) finite element mesh



3.19 pav. Naudojamos varžtų ir mazginių lakštų plieno (a), šaltai lankstyčių plieninių elementų (b) įtempių ir deformacijų diagramos modeliuojant kompiuteriniu paketu ANSYS Workbench: 1) varžtams; 2) 12 mm storio mazginiam lakštui; 3) 6, 8 ir 10 mm storio mazginiams lakštams; 4) šaltai lankstytiems plieniniams elementams

Fig. 3.19. Stress-strain diagrams for finite element modelling using ANSYS Workbench software for bolts, gusset plates (a) and cold-formed steel elements (b): 1) for bolts; 2) 12 mm thickness gusset plates; 3) 6, 8 ir 10 mm thickness gusset plates; 4) cold-formed steel elements

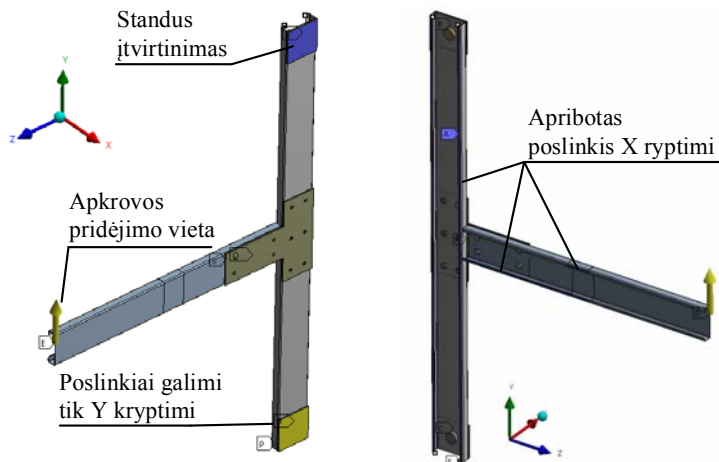
Modeliuojami sijos ir kolonos mazgo aštuoni bandiniai, kaip kad ir laboratoriniuose tyrimuose. 3.18 paveiksle pateiktas analizuojamo mazgo baigtinių elementų erdvinis modelis ir baigtinių elementų tinklelis.

Buvo modeliuojama pusė sijos ir kolonos mazgo, nes analizuojamas mazgas yra simetriškas Y–Z plokštumai. Taip buvo taupomas laikas, skirtas modeliuoti ir skaičiuoti baigtinių elementų paketui. Plieniniams šaltai lankstytiems elementams ir mazginiam lakštui parinkti SOLSH190 baigtiniai elementai (3.18 b pav.). Tai hibridiniai baigtiniai elementai, kurie yra tūriniai baigtiniai elementai (turi aštuonis taškus, kiekvienas po tris laisvės laipsnius), bet aprašomi pagal plokštelių Mindlino teoriją (Benerjee *et al.* 2011; Barauskas *et al.* 2001; Atkočiūnas ir Nagevičius 2004). Varžtams modeliuoti buvo naudojami SOLID186 baigtiniai elementai. Šie erdviniai baigtiniai elementai turi 20 taškų, kurie turi po tris laisvės laipsnius – gali pasisukti x , y ir z kryptimis.

Baigtinių elementų tinklelio dydis parinktas toks, kad baigtinio elemento kraštinių santykis būtų ne didesnis kaip 1:2.

Mazginio lakšto ir varžtų plienas buvo aprašytas naudojant dvitiesį, o plieniniai šaltai lankstyti elementai buvo aprašyti naudojant tritiesį (Laim *et al.* 2013) tampriai plastinį modelį (3.19 pav.), kuriuose tamprumo modulis $E =$

210 GPa ir Puasono koeficientas $\nu = 0,3$. Plieno savybės buvo aprašytos remiantis medžiagų savybių tyrimų rezultatais.



3.20 pav. Baigtinių elementų modelio kraštinės sąlygos

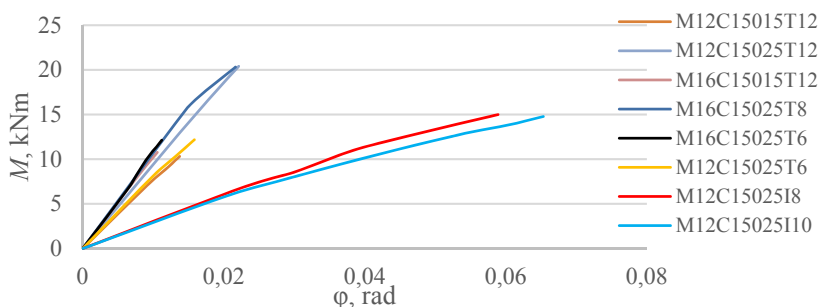
Fig. 3.20. Boundary conditions of finite element model

Sutelktoji taškinė apkrova buvo sumodeliuota gembės gale kaip ir laboratoriniuose bandymuose. Sumodeliuoti atraminiai kaiščiai, kurių kraštinės sąlygos aprašytos taip, kad viršutinis yra įtvirtintas standžiai, o apatinis gali pasislinkti tik Y kryptimi (3.20 pav.). Sijų ir kolonų elementai suvaržyti X kryptimi, kad neišskluptų iš plokštumos. Norint sutaupyti skaičiavimams skirtą laiką, pritaikytos simetrijos sąlygos Y–Z plokštumoje. Tose vietose, kuriose sijos ir kolonos elementų lentynose laboratorinių bandymų metu buvo naudojami šoniniai įtvirčiai, kad mazgas neišskluptų iš plokštumos, X kryptimi suvaržytas poslinkis. Tarp elementų parinkti tokie sąlyčio paviršiai, kad elementai negalėtų vienas į kitą įsiskverbti, bet galėtų vienas kito atžvilgiu pasislinkti (trinties koeficientas lygus 0) (angl. *no penetration*). Skylės varžtams buvo sumodeliuotos kaip ir atliekant laboratorinius bandymus, t. y. 1 mm didesnės už varžtus. Tačiau M/φ kreivės sudarytos neat-sižvelgiant į papildomą pasisukimą – praslydimą, atsiradusį dėl varžtų ir jiems skirtų skylių skirtumo. Buvo sumodeliuoti visi bandiniai, kurie išbandyti laboratorijoje ir aprašyti 2.1 lentelėje.

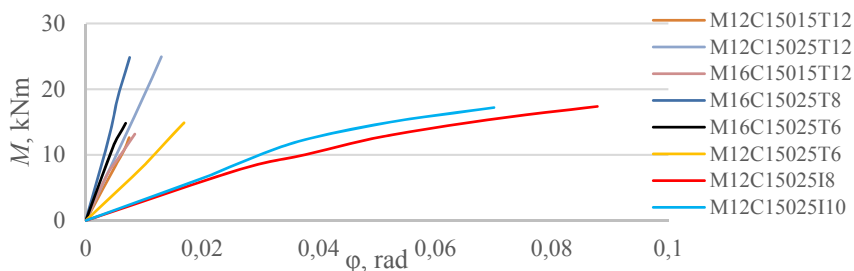
3.2.2. Bandymo baigtinių elementų metodu rezultatai

Pagrindinis modeliavimo baigtinių elementų metodu tikslas – gauti analizei reikalingą tikslų modelį, kuriuo remiantis būtų galima nustatyti mazgo laikomąją galią, sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginio lakšto bei mazgo pradinius sukamuosius standžius. Kadangi modelio, parengto baigtinių elementų metodu, tikslumas grindžiamas laboratoriniais tyrimais, programiniu paketu gauti rezultatai lyginami su laboratorinių tyrimų metu gautais rezultatais.

M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 sijos varžtų grupių pradinis sukamasis standis (3.21 pav.) nuo laboratoriniais bandymais apskaičiuoto skiriasi atitinkamai 5,5 %, 0,2 %, 4,7 %, 3,4 %, 1,7 %, 9,5 %, 3,6 %, 0,5 %. Iš grafikų matyti, kad bandinių M12C15025I8 ir M12C15025I10 sukamasis standis sumažėja atitinkamai ties 11,03 kNm ir 10,53 kNm lenkiamuoju momentu. Taip gali būti, nes aplink varžtų skyles išmatuoti įtempiai, viršijantys plieno takumo įtempius, dėl to pasireiškia plastinės deformacijos (3.23 pav.).

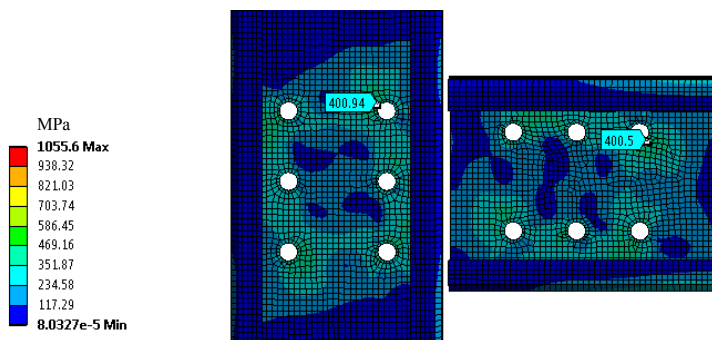


3.21 pav. Baigtinių elementų metodu analizuojamos sijos varžtų grupės M/φ kreivės
Fig. 3.21. Beam bolt group finite element modelling M/φ curves



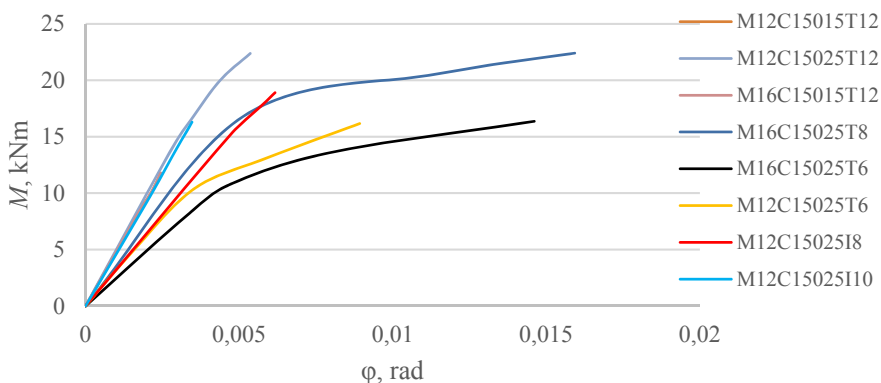
3.22 pav. Baigtinių elementų metodu analizuojamos kolonos varžtų grupės M/φ kreivės
Fig. 3.22. Column bolt group finite element modelling M/φ curves

M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 kolonos varžtų pradinis sukamasis standis (3.22 pav.) nuo laboratoriniais bandymais apskaičiuotų skiriasi atitinkamai 9,7 %, 0,7 %, 16,4 %, 2,4 %, 10,4 %, 12,4 %, 0,3 %, 4,9 %. Taip pat matoma, kad bandinių M12C15025I8 ir M12C15025I10 sukamasis standis sumažėja ties 12,79 kNm ir 12,40 kNm lenkiamuoju momentu. Kolonos plieniniuose šaltai lankstytuose elementuose ties varžtais taip pat išmatuoti įtempiai, didesni už plieno takumo įtempius, dėl kurių pasireiškia plastinės deformacijos ir kurie gali turėti įtakos varžtų grupės sukamojo standžio mažėjimui.



3.23 pav. Bandinio M12C15025I8 von Mises įtempių pasiskirstymas plieniniuose šaltai lankstytuose elementuose apie glemžiamą sienelę

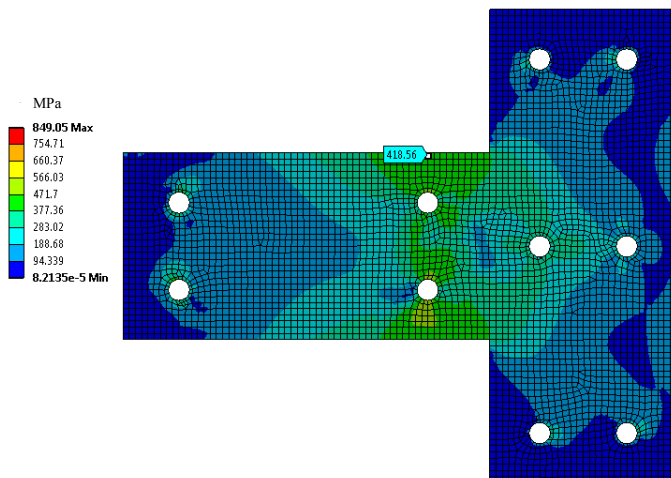
Fig. 3.23. von Mises stress distribution along the bolt holes of cold-formed steel elements of specimen M12C15025I8



3.24 pav. Baigtinių elementų metodu analizuojamo mazginio lakšto M/φ kreivės

Fig. 3.24. Gusset plate finite element modelling M/φ curves

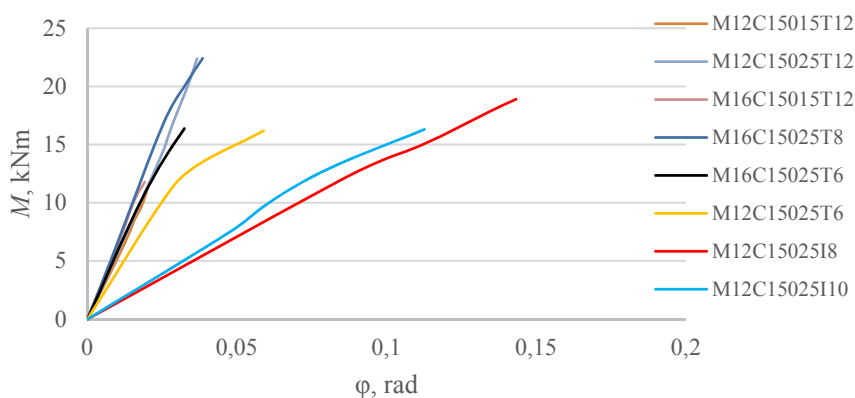
M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandinių mazginio lakšto pradinis sukamasis standis (3.24 pav.) nuo laboratoriniais bandymais apskaičiuotų skiriasi atitinkamai 4,4 %, 1,2 %, 0,8 %, 10,6 %, 5,0 %, 16,5 %, 3,7 %, 0,6 %. Bandinių M16C15025T6, M12C15025T6, M16C15025T8 ir M12C15025T12 sukamasis standis mažėja ties atitinkamai 10,89 kNm, 10,37 kNm, 16,81 kNm ir 20,03 kNm lenkiamuoju momentu. Iš įtempių mazginiame lakšte matyti (3.25 pav.), kad įtempiai viršija takumo įtempius pagal takumo ribą. Dėl to pasireiškia plastinės deformacijos ir sukamasis standis pradeda mažėti. Įtempiai viršija takumo įtempius visame mazginiame lakšto skerspjūvyje, tai parodo, kad atsirado plastinis lankstas



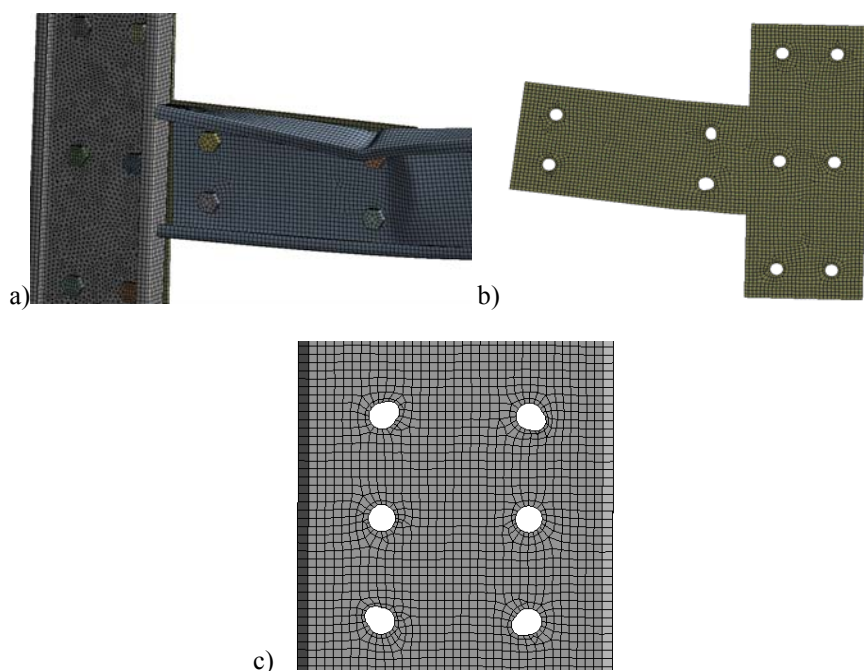
3.25 pav. von Mises įtempių pasiskirstymas mazginiame lakšte

Fig. 3.25. von Mises stress distribution in gusset plate

3.26 paveiksle pateikta modeliavimo baigtinių elementų metodu mazgų M/φ kreivės. M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandinių pradinis sukamasis standis nuo laboratoriniais bandymais apskaičiuotų skiriasi 3,0 %, 6,4 %, 9,8 %, 6,5 %, 4,9 %. M12C15025T6, M16C15025T6 ir M16C15025T8 bandinių sukamasis standis sumažėja esant 13,09 kNm, 13,71 kNm ir 16,81 kNm lenkiamajam momentui. Šis sumažėjimas atsirado dėl atsivėrusio plastinio lanksto mazginiame lakšte. M12C15025I8 ir M12C15025I10 bandinių sukamasis standis sumažėja esant 12,40 kNm ir 12,84 kNm lenkiamajam momentui.

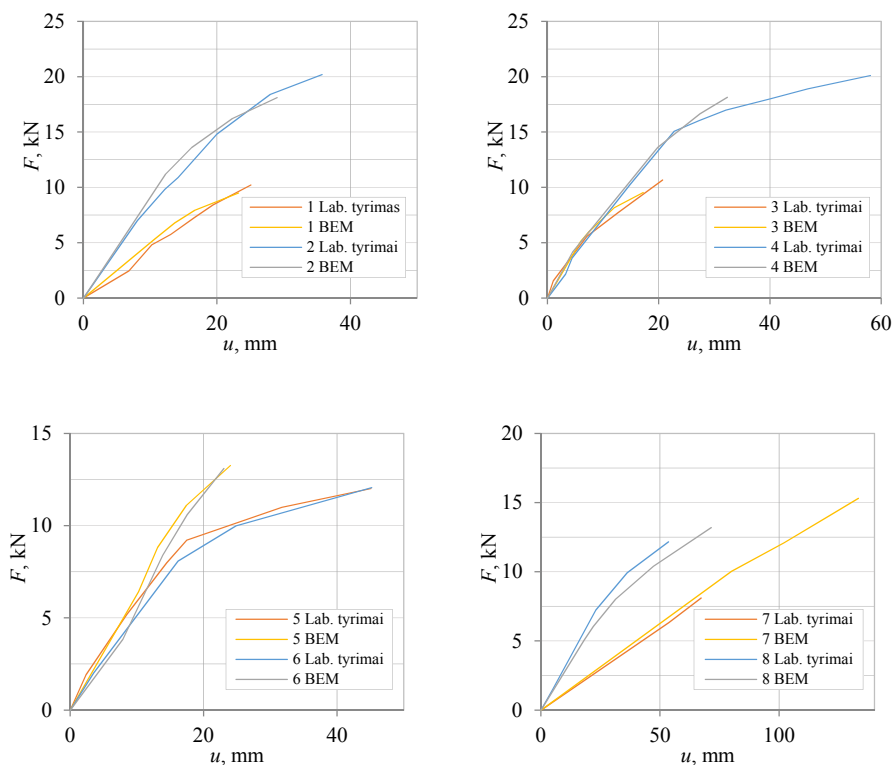


3.26 pav. Baigtinių elementų metodu analizuojamo mazgo M/φ kreivės
Fig. 3.26. Joint finite element modelling M/φ curves



3.27 pav. Bandinių irties pobūdis medelijuojant baigtiniais elementais: a) sijos elementų vietinė kluptis; b) mazginio lakšto patekėjimas; c) elementų sienelės glemžimas
Fig. 3.27. Finite element investigation failure modes of the specimens: a) local buckling of cold-formed elements; b) yielding of gusset plate; c) bearing of cold-formed elements

3.27 paveiksle pateiktas visų bandinių, sumodeliuotų baigtinių elementų metodu, irties pobūdis. Pirmų trijų bandinių (M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12) bandinio irties pobūdis – sijos elementų sienelės klupimas. Kitų trijų bandinių (M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6) irties pobūdis taip pat vienodas – mazginio lakšto plieno patekėjimas ties labiausiai nutolusia nuo gembės sijos varžtų grupės vertikaliąja eile. Šiame pjūvyje ties apatiniu varžtu, kur tempiami sluoksniai, matyti, kad susiformavo kaklelis, o varžto skylė tapo ovali. Likusių dviejų bandinių irties pobūdis taip pat vienodas – kolonos elementų sienelės glemžimas, elementų varžtų skylės tapo ovalios.



3.28 pav. Laboratorinių tyrimų metu ir modeliavimo baigtinių elementų metodu gautos gembės įlinkių nuo apkrovos kreivės: 1 – M12 C15015 T12; 2 – M12 C15025 T12; 3 – M16 C15015 T12; 4 – M16 C15025 T8; 5 – M16 C15025 T6; 6 – M12 C15025 T6; 7 – M12 C15025 I8; 8 – M12 C15025 I10

Fig. 3.28. Deflection of cantilever under laboratory investigation and finite element modelling: 1 – M12 C15015 T12; 2 – M12 C15025 T12; 3 – M16 C15015 T12; 4 – M16 C15025 T8; 5 – M16 C15025 T6; 6 – M12 C15025 T6; 7 – M12 C15025 I8; 8 – M12 C15025 I10

3.4 lentelė. Modeliavimo baigtinių elementų metodu laikomosios galios ir pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės

Table 3.4. Finite element modelling bending moment resistance and initial rotational stiffness values

Bandinys	$M_{j,R,bem}$, kNm	$S_{bbg,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{cbg,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{gp,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{j,ini,bem}$, kNm/rad
M12C15015T12	11,73	731,32	1815,58	4767,79	523,40
M12C15025T12	22,37	938,28	1920,29	4974,28	568,44
M16C15015T12	11,78	988,88	2298,62	4818,74	636,60
M16C15025T8	16,81	1101,15	3264,01	3272,51	645,81
M16C15025T6	12,84	1064,85	2678,75	2436,42	577,33
M12C15025T6	10,37	899,82	953,43	3159,05	403,66
M12C15025I8	18,91	312,94	302,78	3225,22	140,90
M12C15025I10	16,30	323,04	281,23	4463,64	146,60

3.28 paveiksle pateiktos laboratorinių tyrimų metu ir modeliavimo baigtinių elementų metodu gautos gembės įlinkių priklausomybės nuo apkrovos vertės. Gembės įlinkis baigtinių elementų metodu gautas matuojant vertikaliuosius poslinkius toje pačioje vietoje kaip ir laboratorinių tyrimų metu. Paveiksle matyti, kad skirtumai tarp šių dviejų metodų yra nedideli.

3.4 lentelėje pateikta mazgų laikomosios galios $M_{j,R,bem}$, sijos varžtų grupių $S_{j,ini,bbg,bem}$, kolonos varžtų grupių $S_{j,ini,cbg,bem}$, mazginių lakštų $S_{j,ini,gp,bem}$ ir mazgų $S_{j,ini,bem}$ pradiniai sukamieji standžiai modeliuojant baigtinių elementų metodu.

Baigtinių elementų metodo ir laboratorinių tyrimų irties pobūdis sutapo. Bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025 T8, M12 C15025 T6, M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais apskaičiuota laikomoji galia buvo didesnė už BEM 2,04–16,00 %, o bandinių M16 C15025 T6 ir M12 C15025 I8 laboratoriniais tyrimais apskaičiuota laikomoji galia mažesnė už BEM 8,80–12,73 %. Bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12 sijos varžtų grupių laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už BEM 0,2–5,5 %, o bandinių M16 C15025 T8, M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už BEM 0,5–9,5 %. Bandinio M12 C15025 I10 kolonos varžtų grupių laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už BEM 4,9 %, o bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025 T8, M16 C15025 T6, M12

C15025 T6, M12 C15025 I8 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už BEM 0,3–16,4 %. Bandinių M16 C15015 T12 ir M16 C15025 T6 mazginio lakšto laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už BEM 0,8–5,0 %, o bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15025 T8, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8, M12C15025I10 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už BEM 0,6–16,5 %. Bandinio M16 C15025 T8 viso mazgo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už BEM 3,0 %, o bandinių M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8, M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už BEM 4,9–9,8 %.

3.3. Komponentų metodo modelio vertinimas

Šiame poskyryje pateikiami laikomosios galios ir pradinio sukamojo standžio skaičiavimų komponentų metodu, laboratorinių tyrimų ir modeliavimo baigtinių elementų metodais rezultatai. Poskyryje lyginami sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginio lakšto bei sijos ir kolonos mazgo M/φ kreivės ir rezultatai.

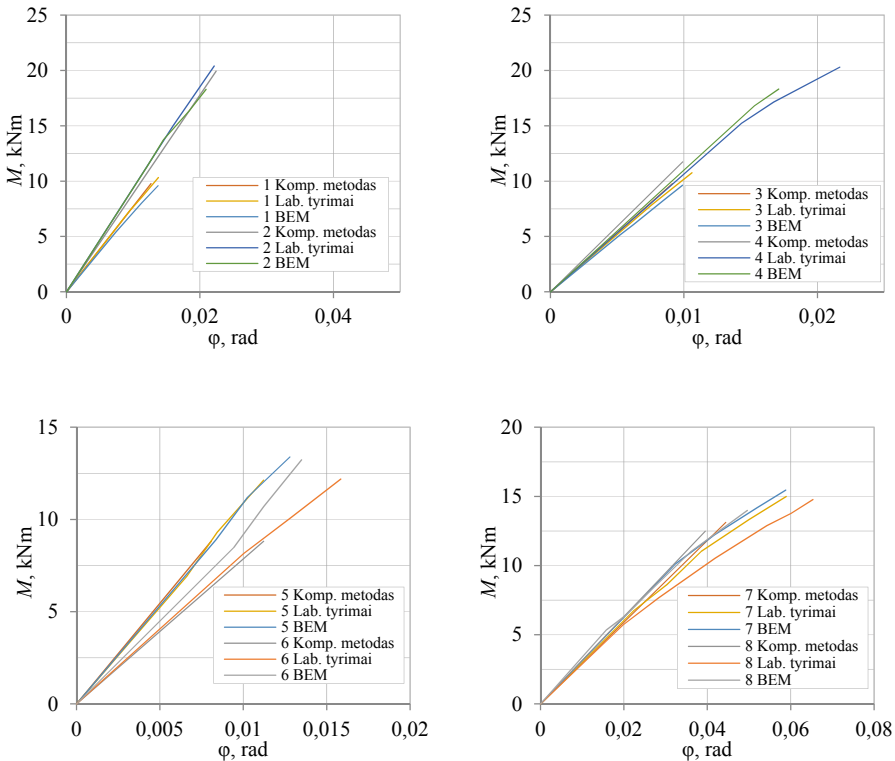
3.5 lentelė. Sijos varžtų grupės matuoto pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės, gautos laboratorinio tyrimo, baigtinių elementų ir komponentų metodais

Table 3.5. Beam bolt group initial rotational stiffness values calculated using laboratory investigation, finite element modelling and component method

Bandinys	$S_{bbg,ini,exp}$ kNm/rad	$S_{bbg,ini,bem}$ kNm/rad	$S_{bbg,ini,komp}$ kNm/rad
M12C15015T12	773,95	731,32	772,81
M12C15025T12	940,03	938,28	889,77
M16C15015T12	1037,25	988,88	1070,40
M16C15025T8	1064,19	1101,15	1186,61
M16C15025T6	1046,93	1064,85	1173,73
M12C15025T6	814,43	899,82	786,64
M12C15025I8	301,79	312,94	295,65
M12C15025I10	321,29	323,04	316,06

Sijos varžtų grupės M/φ kreivės pateiktos 3.29 paveiksle, pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės, gautos visais trimis metodais, – 3.5 lentelėje.

M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandinių sijos varžtų grupių pradinis sukamasis standis, skaičiuojant komponentų metodu, nuo modeliavimo baigtinių elementų metodu skiriasi atitinkamai 5,4 %, 5,2 %, 7,6 %, 7,2%, 9,3 %, 12,6 %, 5,5 %, 2,2 %, o nuo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotų verčių – 0,2 %, 5,3 %, 3,1 %, 10,3%, 10,8 %, 3,4 %, 2,0 %, 1,6 %.



3.29 pav. Sijos varžtų grupės M/ϕ kreivės, gautos laboratorinio tyrimo, baigtinių elementų ir komponentų metodais: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Fig. 3.29. Beam bolt group M/ϕ curves using laboratory investigation, finite element modelling and component method: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Pirmų šešių bandinių (su T formos mazginiais lakštais) sijos varžtų grupių laboratorinių tyrimų ir baigtinių elementų metodo M/φ kreivės yra artimos tiesei formos. Jas gerai reprezentuoja komponentų metodas, kurio M/φ kreivė pateikta tiese. Tačiau likusių dviejų bandinių (su stačiakampio formos mazginiais lakštais) M/φ kreivėse ties apytiksliai 2/3 laikomosios galios, kurios reprezentuoja laboratorinius tyrimus ir baigtinių elementų metodą, pastebimas nežymus sukamojo standžio sumažėjimas, dėl glemžiamosios deformacijos ties varžtų ir plieninio šaltai lankstyto elemento sąlyčiu. Tačiau dėl šios priežasties nereikėtų keisti komponentų metodo M/φ kreivės pobūdžio iš tiesės į tritiesį modelį.

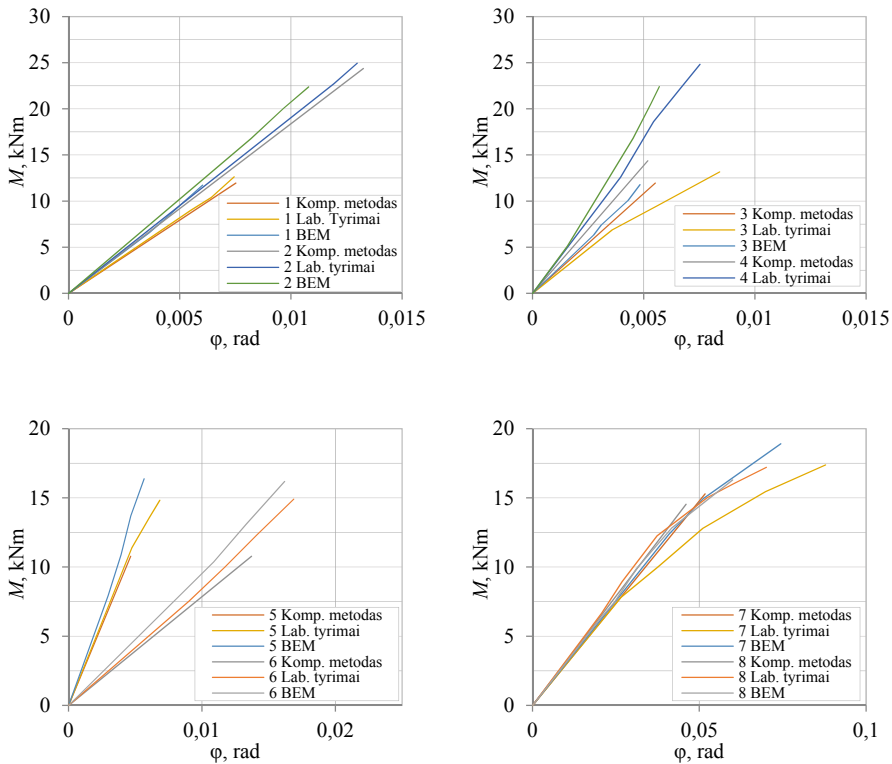
3.6 lentelė. Kolonos varžtų grupės pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės, gautos laboratorinių tyrimų, baigtinių elementų ir komponentų metodais

Table 3.6. Column bolt group initial rotational stiffness values calculated using laboratory investigation, finite element modelling and component method

Bandinys	$S_{cbg,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{cbg,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{cbg,ini,komp}$, kNm/rad
M12C15015T12	1639,60	1815,58	1589,70
M12C15025T12	1906,64	1920,29	1840,32
M16C15015T12	1921,94	2298,62	2165,52
M16C15025T8	3185,44	3264,01	2771,96
M16C15025T6	2400,57	2678,75	2318,05
M12C15025T6	834,99	953,43	786,64
M12C15025I8	301,79	302,78	295,65
M12C15025I10	295,73	281,23	316,06

Kolonos varžtų grupės M/φ kreivės pateiktos 3.30 paveiksle, o pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės pagal visus tris metodus – 3.6 lentelėje. M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025 T8, M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8, M12 C15025 I10 bandinių kolonos varžtų grupių pradinis sukamasis standis, skaičiuojant komponentų metodu, nuo modeliavimo baigtinių elementų metodu skiriasi atitinkamai 12,4 %, 4,2 %, 5,8 %, 15,1 %, 13,5 %, 17,5 %, 2,4 %, 11,0 %, o nuo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotų verčių – 3,0 %, 3,5 %, 11,2 %, 13,0 %, 3,4 %, 5,8 %, 2,0 %, 6,4 %. Kaip ir ankstesniu atveju pirmų šešių bandinių (su T formos mazginiais lakštais) M/φ kreivės, kurios reprezentuoja laboratorinius tyrimus ir baigtinių elementų metodą, yra artimesnės tiesės formai, nei tritiesiam modeliui, kurie aprašyti antroje skyriuje. Galima pastebėti šių bandinių M/φ kreivėse nežymius sukamojo

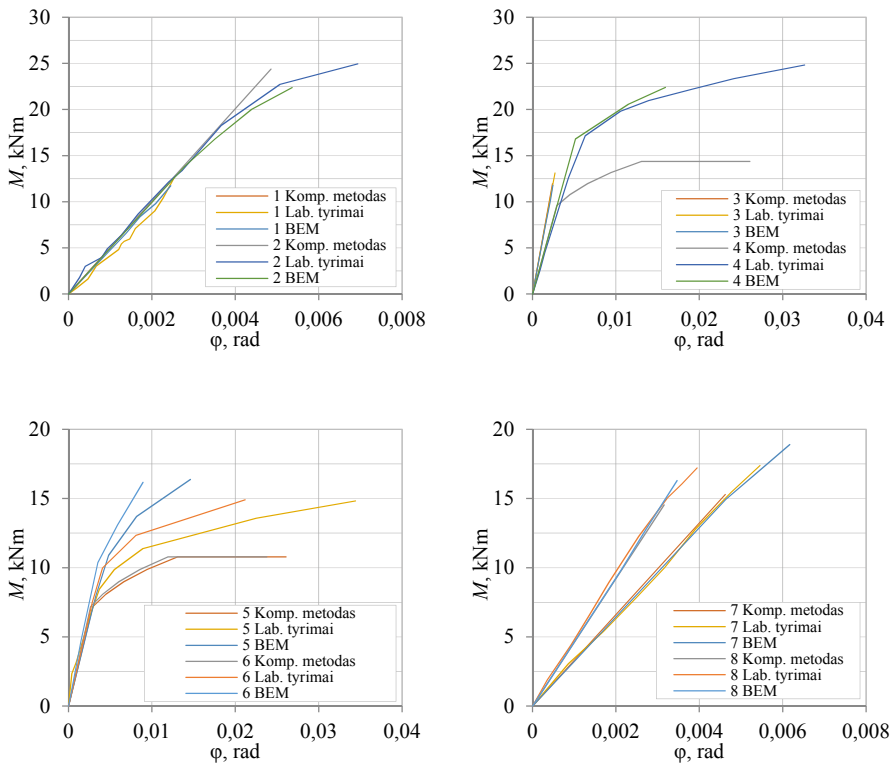
standžio sumažėjimus, kurie galėjo atsirasti dėl sudėtingų varžtų ir plieninio šaltai lankstyto elemento sąlyčio paviršių todėl, kad plieniniai šaltai lankstyti elementai buvo glemžiami sriegtos varžto dalies, neidealiai išgręžtų varžtams skirtų skylių. Tačiau tai nėra pagrindas keisti M/φ kreivės pobūdį iš tiesės į trijų tiesių modelį. Paskutiniuose dviejuose bandiniuose (su stačiakampio formos mazginiais laikštais), dėl glemžiamosios deformacijos matyti sukamojo standžio sumažėjimas ties apytiksliai 2/3 laikomąja galia. Tačiau vertinant sukamojo standžio sumažėjimą M/φ kreivės komponentų metodu parinktos tiesės formos.



3.30 pav. Kolonos varžtų grupės M/φ kreivės, gautos laboratorinio tyrimo, baigtinių elementų ir komponentų metodais: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

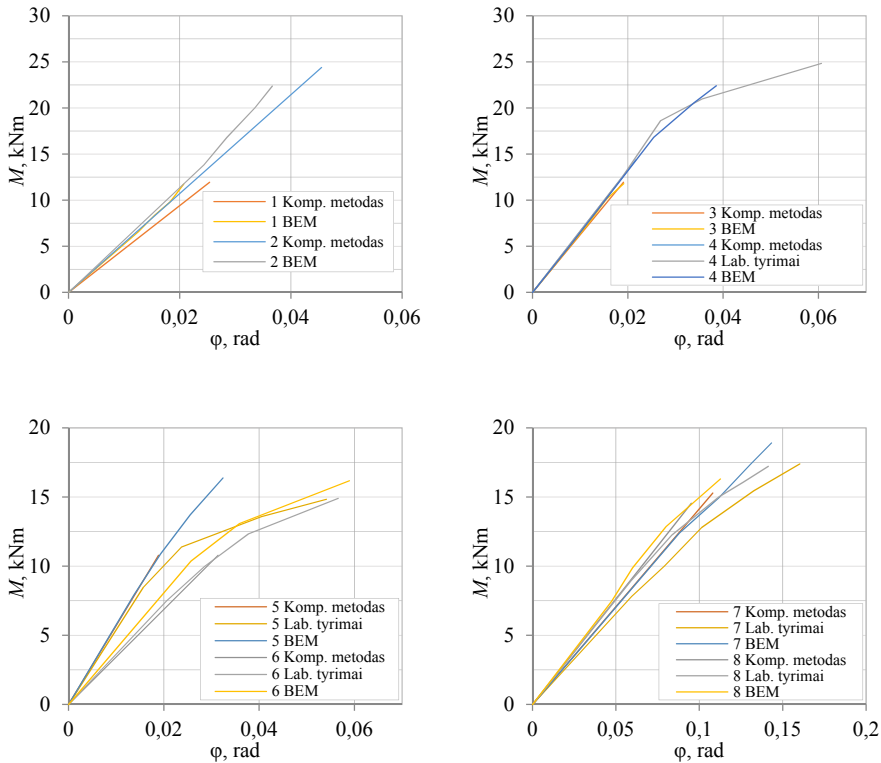
Fig. 3.30. Column bolt group M/φ curves using laboratory investigation, finite element modelling and component method: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Mazginio lakšto M/φ kreivės pateiktos 3.31 paveiksle, pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės pagal visus tris metodus – 3.7 lentelėje. M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandinių mazginio lakšto pradinis sukamasis standis, skaičiuojant komponentų metodu, nuo modeliavimo baigtinių elementų metodu skiriasi atitinkamai 5,1 %, 1,0 %, 4,1 %, 1,0 %, 1,8 %, 13,9 %, 2,6 %, 3,2 %, o nuo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotų verčių – 9,3 %, 2,1 %, 3,3 %, 11,6 %, 3,3 %, 3,0 %, 6,2 %, 3,8 %.



3.31 pav. Mazginio lakšto M/φ kreivės, gautos laboratorinio tyrimo, baigtinių elementų ir komponentų metodais: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Fig. 3.31. Gusset plate M/φ curves using laboratory investigation, finite element modelling and component method: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10



3.32 pav. Mazgo M/φ kreivės, gautos laboratorinio tyrimo, baigtinių elementų metodu ir komponentų metodu: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Fig. 3.32. Joint M/φ curves using laboratory investigation, finite element modelling and component method: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Pirmų trijų (su 12 mm storio T formos mazginiais lakštais) ir paskutinių dviejų (su stačiakampio formos mazginiais lakštais) bandinių mazginio lakšto M/φ kreivės, kurios reprezentuoja laboratorinius tyrimus ir baigtinių elementų metodą, yra artimos tiesei. Minėti tyrimai parodė, kad šių bandinių mazginiai lakštai deformavosi tamprioje stadijoje. Tačiau M16C15025T8, M16C15025T6 ir M12C15025T6 bandinių M/φ kreivėse matyti žymus sukamojo standžio sumažėjimas – baigtinių elementų metodas parodė, kad ties varžtų skylėmis susilpnintu

skerspjuviu mazginis lakštas deformavosi tampriai – plastiškai. Šiuo atveju siūlomo komponentų metodo trijų tiesių modelio M/φ kreivės galas tiesė, bet laboratoriniai tyrimai ir baigtinių elementų metodas rodo sustiprėjimą. Į šį sustiprėjimą mazginio lakšto laikomosios galios skaičiavimo metodika neatsižvelgia, nes mazginio lakšto laikomosios galios skaičiavimo metodika pateikta tik tamprioje stadijoje.

3.7 lentelė. Pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės, gautos mazginio lakšto laboratoriniu tyrimu, baigtinių elementų ir komponentų metodais

Table 3.7. Gusset plate initial rotational stiffness values calculated using laboratory investigation, finite element modelling and component method

Bandinys	$S_{gp,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{gp,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{gp,ini,komp}$, kNm/rad
M12C15015T12	4557,15	4767,79	5022,19
M12C15025T12	4915,90	4974,28	5022,19
M16C15015T12	4857,67	4818,74	5022,19
M16C15025T8	2924,30	3272,51	3306,51
M16C15025T6	2563,86	2436,42	2480,18
M12C15025T6	2638,23	3159,05	2720,26
M12C15025I8	3106,50	3225,22	3310,48
M12C15025I10	4435,59	4463,64	4610,73

Mazgo M/φ kreivės pateiktos 3.32 paveiksle, pradinio sukamojo standžio skaitinės vertės pagal visus tris metodus – 3.8 lentelėje. M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandinių mazgo pradinis sukamasis standis, skaičiuojant komponentų metodu, nuo modeliavimo baigtinių elementų metodu skiriasi atitinkamai 10,0 %, 5,7 %, 1,5 %, 2,7 %, 1,0 %, 14,9 %, 5,8 %, 4,1 %, o M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 bandiniai nuo laboratoriniais tyrimais nustatytų verčių skiriasi 0,2 %, 5,4 %, 5,7 %, 12,0 %, 8,8 %. Pirmų trijų bandinių (su 12 mm storio T formos mazginiais lakštais), kurių suirties pobūdis – plieninių šaltai lankstytų elementų vietinė kluptis, eksperimentinių tyrimų M/φ kreivės forma artimesnė tiesės formai, tai gerai reprezentuoja siūlomo komponentų metodo tiesės formos M/φ kreivė. Kitų trijų bandinių (su 8 ir 6 mm storio T formos mazginiais lakštais), kurių iirties pobūdis mazginio lakšto iirtis, eksperimentinių tyrimų M/φ kreivės

rodo žymų sukamojo standžio sumažėjimą. Tačiau komponentų metodu skaičiuota laikomoji galia yra mažesnė už eksperimentiniais tyrimais fiksuotą sukamojo standžio sumažėjimo skaitines vertes, todėl komponentų metodu parinktas tiesės modelis M/φ kreivei. Likusių dviejų bandinių (su stačiakampio formos mazginiais lakštais), kurių irties pobūdis plieninių šaltai lankstytų elementų glemžimas, eksperimentinių tyrimų M/φ kreivės rodo taip pat žymų sukamojo standžio sumažėjimą. Tačiau komponentų metodu skaičiuotos laikomosios galios skaitinės vertės yra taip pat mažesnės už sukamojo standžio sumažėjimo skaitines vertes, todėl M/φ kreivės modelis parinktas tiesės formos.

3.8 lentelė. Pradinio sukamojo standžio ir laikomosios galios skaitinės vertės, gautos mazgo laboratoriniu tyrimu, baigtinių elementų ir komponentų metodais

Table 3.8. Joint initial rotational stiffness and bending moment resistance values calculated using laboratory investigation, finite element modelling and component method

Bandinys	$M_{j,R,exp}$, kNm	$M_{j,R,bem}$, kNm	$M_{j,R,komp}$, kNm	$S_{j,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{j,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{j,ini,komp}$, kNm/rad
M12C15015T12	12,62	11,73	11,95	–	523,40	471,22
M12C15025T12	24,95	22,37	24,38	–	568,44	535,79
M16C15015T12	13,17	11,78	11,95	–	636,60	626,89
M16C15025T8	17,16	16,81	14,36	665,63	645,81	664,02
M16C15025T6	11,39	12,84	10,78	540,48	577,33	571,54
M12C15025T6	12,34	10,37	10,78	364,28	403,66	343,64
M12C15025I8	17,38	18,91	15,29	131,70	140,90	149,59
M12C15025I10	17,22	16,30	15,98	139,43	146,60	152,80

Visų aštuonių mazgų irties pobūdžiai skaičiuojant mazgų laikomąją galią pagal 2.2 skyrelyje pateiktą metodiką sutapo su modeliavimu baigtinių elementų metodu ir laboratorinių tyrimų metu gautais irties pobūdžiais. Pirmų trijų bandinių M12C15015T12, M12C15025T12 ir M16C15015T12, kurių suirimo pobūdis – sijos plieninių šaltai lankstytų elementų vietinė kluptis, skaičiuojant komponentų metodu, bandinių laikomoji galia skiriasi nuo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotosios atitinkamai 5,3 %, 2,3 % ir 9,3 %, o nuo modeliavimo baigtinių elementų metodu – atitinkamai 1,8 %, 8,2 %, 1,4 %. Kitų trijų bandinių M16 C15025 T8, M16 C15025 T6 ir M12C15025T6, kurių irties pobūdis yra mazginio lakšto irtis dėl lenkiamojo momento, lyginant su laboratorinių bandymų rezultatais laikomoji

galia skiriasi atitinkamai 16,3 %, 5,4 %, 12,6 %, o lyginant su modeliavimo baigtinių elementų metodu – atitinkamai 14,6 %, 16,0 %, 3,8 %. Likusių dviejų bandinių M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10, kurių irties pobūdis plieninių šaltai lankstytų elementų sienelės glemžimas, laikomosios galios, lyginant su laboratorinių tyrimų metu gautais rezultatais, skyrėsi atitinkamai 12,0 % ir 7,2 %, o su modeliavimo baigtinių elementų metodu – atitinkamai 19,1 % ir 2,0 %.

Bandinių M12C15015T12, M12C15025T12, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 sijos varžtų grupių laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotą nuo 0,2 % iki 5,3 %, o bandinių M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotą nuo 3,1 % iki 10,8 %. Bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15025 T8, M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8 kolonos varžtų grupių laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotą 2,0–13,0 %, o bandinių M16 C15015 T12 ir M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotą 6,4–11,2 %. Bandinio M16 C15025 T6 mazginio lakšto laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotą 3,3 %, o bandinių M12 C15015 T12, M12 C15025 T12, M16 C15015 T12, M16 C15025T8, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotą 2,1–11,6 %. Bandinių M16 C15025 T8 ir M12 C15025 T6 mazgo laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotą 0,2–5,7 %, o bandinių M16 C15025 T6, M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotą 5,4–12,0 %.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Laboratoriniai tyrimai parodė, kad kai mazginis lakštas yra pakankamo storio (pagal darytus laboratorinius tyrimus – bent 6 mm) ir naudojant atitinkamus šoninius įtvirčius, mazginio lakšto irties metu atsiranda plastinis lankstas, t. y. pasiekiamos tampriai platinės deformacijos, kurios padidina mazginio lakšto laikomąją galią.
2. Kai mazgo irtis yra elementų vietinė kluptis, M/φ kreivėms būdingas tiesiškumas, nes irtis vyksta esant tampriajai stadijai. Kai mazgo irtis yra

mazginio lakšto irtis, vyksta sijos ir kolonos elementų sienelės glemžimas, tuomet būdingos M/φ kreivės gale atsiranda netiesiškumas, nes pasireiškia plastinės deformacijos.

3. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad varžtų grupių sukamajam standžiui didžiausią įtaką turi atstumas tarp varžtų, plieninių šaltai lankstytų elementų sienelės storis ir varžto skersmuo.
4. Sudarytas baigtinių elementų modelis leidžia įvertinti fizinių plieno netiesiškumą ir geometrinį netiesiškumą. Sudarytas baigtinių elementų metodo modelis atitinka laboratorinių tyrimų metu gautą elgseną ir leidžia nustatyti tiriamo pusiau standaus varžtinio mazgo laikomąją galią $M_{j,R,bem}$, pradinį sijos ir kolonos varžtų grupių, mazginio lakšto ir mazgo sukamuosius standžius, $S_{bbg,ini,bem}$, $S_{cbg,ini,bem}$, $S_{gp,ini,bem}$, $S_{j,ini,bem}$. Aprašytas baigtinių elementų modelis atkartoja šiems mazgams būdingus laboratoriniais bandymais gautus irties pobūdžius – plieninio šaltai lankstyto elemento sienelės glemžimą, mazginio lakšto patekėjimą, plieninio šaltai lankstyto elemento vietinę klyptį.
5. Bandinio M16 C15025 T8 mazgo laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis didesnis už baigtinių elementų metodu nustatytą 3,0 %, o bandinių M16 C15025 T6, M12 C15025 T6, M12 C15025 I8, M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis mažesnis už baigtinių elementų metodu nustatytą 4,9–9,8 %. Nuokrypiai galėjo atsirasti dėl sudėtingų varžtų ir glemžiamų elementų sąlyčio sąlygų, tačiau modeliavimo baigtiniais elementais tikslumas yra pakankamas ir galima taikyti šį metodą plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų tyrimams.
6. Eksperimentiniai tyrimai patvirtina, kad komponentų metodas yra tinkamas skaičiuoti plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių jungčių laikomąją galią ir sukamąjį standį jį papildžius mazginio lakšto laikomosios galios ir sukamojo standžio išraiškomis.
7. Bandinių M16 C15025 T8 ir M12 C15025 T6 mazgo laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotą 0,2–5,7 %, o bandinių M16 C15025 T6, M12 C15025 I8 ir M12 C15025 I10 laboratoriniais tyrimais apskaičiuotas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotą 5,4–12,0 %.
8. Atlikus palyginimą visais trimis metodais nustatyta, kad mazgų irties pobūdis, skaičiuojant mazgo laikomąją galią pagal komponentų metodą, sutapo su laboratorinių tyrimų metu ir baigtinių elementų modeliavimu gautais irties pobūdžiais. Lyginant komponentų metodo skaičiavimų rezultatus su laboratorinių tyrimų rezultatais, laikomosios galios vertės yra mažesnės 2,3–16,3 %. Tai rodo, kad pasiūlytas komponentų metodas yra

tinkamas skaičiuoti plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų laikomąją galią, nes komponentų metodas užtikrina pakankamą laikomosios galios atsargą.

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą, kurioje pateikiama plieninių šaltai lankstytų elementų varžtinių mazgų projektavimo metodika, nustatyta, kad sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti nėra pasiūlyta komponentų metodo, tinkamo visų tipų plieninių šaltai lankstytų elementų mazgams. Šiuo metu Europos Sąjungoje galiojančiose projektavimo normose (eurokoduose) taip pat nėra pateikta metodikos, tinkamos plieninių šaltai lankstytų elementų mazgų sukamajam standžiui ir laikomajai galiai skaičiuoti.

2. Pasiūlytas trijų spyruoklių komponentų metodas, tinkamas plieninių šaltai lankstytų elementų su mazginiu lakštu ir varžtais sukamajam standžiui skaičiuoti. Naudojant pasiūlytą komponentų metodą mazgo pasisukimas dėl lenkiamąjo momento nagrinėjamas kaip atskirų jo dalių – sijos ir kolonos varžtų grupių bei mazginio lakšto – pasisukimas. Metodas papildytas mazginio lakšto sukamojo standžio matematinėmis išraiškomis.

3. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad pasiūlytoji metodika yra tinkama teoriniams mazginio lakšto laikomosios galios $M_{gp,Rd}$ skaičiavimams komponentų metodu ir sudarytos formulės gali būti taikomos tuo atveju, kai vertikaliwoje varžtų eilėje yra du arba trys varžtai.

4. Eksperimentiniai tyrimai patvirtina, kad taikant komponentų metodą turi būti naudojamos skirtingos M/φ kreivės skirtingiems mazgo irties pobūdžiams:

kai mazgo irtis yra varžtų kirpimas ir plieninių šaltai lankstytų elementų bei mazginio lakšto glemžimas varžtais, turi būti naudojamas vienos tiesės modelis, o kai mazgo irtis yra mazginio lakšto patekėjimas, turi būti naudojamas trijų tiesių modelis.

5. Sudarytasis analizuojamo mazgo baigtinių elementų modelis atitinka laboratorinių tyrimų metu gautą elgseną. Nustatyta, kad sudarytas baigtinių elementų modelis geba atkartoti laboratoriniais bandymais gautus irties pobūdžius – tiek staigų irties pobūdį dėl plieninių šaltai lankstytų elementų vietinės klupties, tiek tampriai platinį dėl mazginio lakšto plieno takumo ir plieninių šaltai lankstytų elementų sienelių glemžimo. Tai parodo, kad pateiktas baigtinių elementų modelis tinkamas kuriamiems teoriniams modeliams tikrinti.

6. Komponentų metodas gali būti taikomas mazgo irties pobūdžiui nustatyti – irties pobūdžiai sutampa su laboratorinių bandymų tyrimų ir modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatais.

7. Laboratoriniai ir baigtinių elementų modeliavimo tyrimai parodo, kad naudojant atitinkamus šoninius įtvirčius, mazginio lakšto irties metu atsiranda plastinis lankstas, t. y. pasiekiamos tampriai plastinės deformacijos, kurios padidina mazginio lakšto laikomąją galią. Tai patvirtina prielaidas, pagal kurias buvo pasiūlyta mazginio lakšto lenkiamosios galios skaičiavimo metodika, kuria įvertinama, kad takumo įtempiai pasiekiami per visą mazginio lakšto skerspjūvį.

8. Lyginant komponentų metodu gautus rezultatus su laboratorinių tyrimų rezultatais, matyti, kad laikomosios galios vertės yra mažesnės 2,3–16,3 %. Lyginant su baigtinių elementų metodu, keturių bandinių komponentų metodu nustatyta laikomoji galia yra didesnė 1,4–8,2 %, o likusių keturių bandinių mažesnė 2,0–19,1 %. Dviejų bandinių mazgo laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis didesnis už komponentų metodu skaičiuotąjį 0,2–5,7 %, o trijų bandinių laboratoriniais tyrimais nustatytas pradinis sukamasis standis mažesnis už komponentų metodu skaičiuotąjį 5,4–12,0 %.

Literatūra ir šaltiniai

Ali, B. A.; Saad, S.; Osman, M. H. 2010. Cold-formed steel frame with bolted moment connections, *International Journal of Civil and Structural Engineering* 3: 534–544.

Ali, B. A.; Saad, S.; Osman, M. H.; Ahmad, Y. 2011. Finite element analysis of cold-formed steel connections, *International Journal of Engineering* 2: 185–193.

Anbarasu, M. 2016. Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams, *Thin-Walled Structures*, 98: 351–359.

Anderson, D.; Colson, A.; Jaspart, J. P. 1995. Connections and frame design for economy, *Costruzioni Metalliche*, 4.

ANSYS Workbench User's Guide. 2009. 124 p.

Atkočiūnas, J.; Nagevičius J. 2004. Tamprumo teorijos pagrindai. Vadovėlis. Vilnius: Technika, 528p.

Azizinamini, A.; Bradburn, J. H.; Radzinski, J. B. 1985: Static and Cyclic behaviour of steel beam – column connections, Structural research studies, Civil engineering department, University of South Carolina.

Barauskas R.; Belevičius R.; Kačianauskas R. 2004. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vadovėlis. Vilnius: Technika, 612 p.

Bayan, A.; Sariffuddin, S.; Hanim, O. 2011. Cold formed steel joints and structures - A review, *International Journal Of Civil And Structural Engineering*, 2 (2): 612–625.

- Benerjee, B.; Chen, Z. J.; Kathirgamanathan, A.; Das R. 2011. *Comparison of ANSYS elements SHELL181 and SOLSH190*, Technical report.
- Bidabadi, B. S.; Naeini, H. M.; Tafti, R. A.; Mazdak, S. 2015. Experimental investigation of the ovality of holes on pre-notched channel products in the cold roll forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 225: 213–220.
- Bryan, E. 1993. The design of bolted joints in cold-formed steel sections, *Thin-Walled Structures* 16: 239–262.
- Chen, W. F.; Kishi, N. 1986. Data base for beam to column connections, I and II, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Chung, K. F.; Ho, H. C. 2005a. Analysis and design of lapped connections between cold-formed steel Z sections, *Thin-Walled Structures*, 43 (7): 1071–1090.
- Chung, K. F.; Ho, H. C.; Wang, A. J. 2005b. An investigation into deformation characteristics of lapped connections between cold-formed steel z sections, *Steel Structures* 5: 23–32.
- Chung, K. F.; Lau, L. 1999. Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members, *Engineering Structures* 21(10): 898–911.
- Chung, K. F.; Lawson, R. M. 2000. Structural performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip, *Engineering Structures*, 22: 1350–1366.
- Chung, K.; Ip, K. 2001. Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections, *Engineering Structures* 23: 1115–1125.
- Cybulski, R.; Walentyński, R.; Cybulska, M. 2014. Local buckling of cold-formed elements used in arched building with geometrical imperfections, *Journal of Constructional Steel Research*, 96: 1–13.
- Daniūnas, A.; Urbonas, K. 2008. Analysis of steel frame with semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces, *Engineering Structures* 30: 3114–3118.
- Daniūnas, A.; Urbonas, K. 2010. Influence of the semi-rigid bolted steel joints on the frame behavior, *Journal of Civil Engineering and Management* 16: 237–241.
- Dawe, J. L.; Liu, Y.; Li, J. Y. 2010. Strength and behaviour of cold-formed steel offset trusses, *Journal of Constructional Steel Research* 66(4): 556–565.
- Dubina, D. 2008. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures, *Thin-walled Structures* 46(7–9): 741–764.
- Dubina, D.; Ungureanu, V. 2010. Behaviour of multi-span cold-formed Z- purlins with bolted lapped connections, *Thin-Walled Structures*, 48 (10-11): 866–871.
- Elkersh, I. 2010. Experimental investigation of bolted cold formed steel frame apex connections under pure moment, *Ain Shams Engineering Journal* 1(1): 11–20.

Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G. 2000. Structural steel semirigid connections. Theory, Design and Software. CRC Press LLC, N. W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida. ISBN 0-8493-7433-2.

Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G. 1996b. A new design approach for braced frames with extended end plate connections, IABSE, Colloquium on Semi-rigid structural connections, Istanbul, September.

Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G. 1997. A new method to design extended end plate connections and semirigid braced frames, *Journal of constructional steel research*, Elsevier science, London.

Feng, R.; Young, B. 2008. Experimental investigation of coldformed stainless steel tubular T-joints, *Thin-Walled Structures*, 46 (10): 1129–1142.

Feng, R.; Young, B. 2013. Stress concentration factors of cold-formed stainless steel tubular X-joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 91: 26–41.

Feng, R.; Young, B. 2015. Theoretical analysis of cold-formed stainless steel tubular joints, *Thin-Walled Structures*, 83 (15): 99–115.

Feng, R.; Young, Ben 2013. Stress concentration factors of cold-formed stainless steel tubular X-joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 91: 26–41.

Feng, R.; Young, Ben 2015. Theoretical analysis of cold-formed stainless steel tubular joints, *Engineering Structures*, 83: 99–115.

Fiorino, L.; Corte, G. D.; Landolfo, R. 2007. Experimental tests on typical screw connections for cold-formed steel housing, *Engineering Structures*, 29: 1761–1773.

Fratamico, D. C.; Torabian S.; Zhao X.; Rasmussen K. J. R.; Schafer B. W. 2018. Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns, *Journal of Constructional Steel Research* 144: 65–80.

Frye, M. J.; Morris, G. A.: 1975. Analysis of flexibly connected steel frames, *Canadian journal of civil engineering*, 2: 280–291.

Gilio F. H. S.; Vieira, L. C. M.; Malite M. 2018. Stability and moment-rotation behavior of cold-formed steel purlins with sleeved bolted connection, *Engineering Structures* 171: 658–672.

Goverdan, A. V. 1983. *A collection of experimental moment-rotation curves and evaluation of prediction equations for semi-rigid connections*, Ph. D. dissertation, Vanderbilt University, Nashville Tennessee.

Gunalan, S.; Heva, Y. B.; Mahendran, M. 2015. Local buckling studies of cold-formed steel compression members at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 108: 31–45.

Gutierrez, R.; Loureiro, A.; Lopez, M.; Moreno, A. 2011. Analysis of cold-formed purlins with slotted sleeve connections, *Thin-walled Structures* 49(7): 833–841.

Hancock, G.J. 2003. Review Article: Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 59: 473–487.

Hazlan, A. H.; Mahen, M. 2010. Bolted beam-column moment connections between cold-formed steel members, in 21st Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM 21), 2005, Victoria University, Melbourne.

Ho, H. C.; Chung, K. F. 2004. Experimental investigation into the structural behaviour of lapped connections between coldformed steel Z sections, *Thin-Walled Structures*, 42 (7): 1013–1033.

Ho, H. C.; Chung, K. F. 2006a. Analytical prediction on deformation characteristics of lapped connections between cold-formed steel Z sections, *Thin-walled Structures* 44(1): 115–130.

Ho, H.C.; Chung, K. F. 2006b. Structural behavior of lapped coldformed steel Z sections with generic bolted configurations, *Thin-Walled Structures*, 44 (4): 466–480.

Hoang V.-L.; Jaspert, J.-P.; Demonceau, J.-F. 2014b. Hammer head beam solution for beam-to-column joints in seismic resistant building frames, *Journal of Constructional Steel Research* 103: 49–60.

Hoang V.-L.; Jaspert, J.-P.; Tran X.-H.; Demonceau, J.-F. 2015. Elastic behaviour of bolted connection between cylindrical steel structure and concrete foundation, *Journal of Constructional Steel Research* 115: 131–147.

Hoang, V.-L.; Demonceau, J.-F.; Jaspert, J.-P. 2014a. Resistance of through-plate component in beam-to-column joints with circular hollow columns, *Journal of Constructional Steel Research* 92: 79–89.

<http://www.lankmeta.lt> [paskutinį kartą žiūrėta 2015 m. birželio 6 d.]

<https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/30617/1/characterisation%20of%20the%20joint%20properties%20by%20means%20of%20the%20component%20method.pdf> [paskutinį kartą žiūrėta 2015 m. birželio 6 d.]

Jaspert Jean – Pierre; Weynand Klaus 2016. Design of joints in steel and composite structures, Portugal: Multicomp Lda, 385 p.

Jaspert, J. –P. 2000. General report: session on connections, *Journal of Constructional Steel Research* 55: 69–89.

Jaspert, J. –P.; Demonceau, J. –P. 2008. European design recommendations for simple joints in steel structures, *Journal of Constructional Steel Research* 64: 822–832.

Jaspert, J-P.; Maquoi, R. 1994. Prediction of the semi-rigid and partial-strength properties of structural joints, Annual technical session proceedings: 177–191.

Johnson, R. P.; Law, C. L. C. 1981. Semi-rigid joints for composite frames, in Joints in structural steelwork, ed. J. H. Howlett *et al.*, Pentech press, London 3.3-3.19.

Kim, T. S.; Kuwamura, H. 2007. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear, *Thin-Walled Structures*, 45 (4): 407–421.

Kim, T. S.; Kuwamura, H.; Cho, T. J. 2008. A parametric study on ultimate strength of single shear bolted connections with curling, *Thin-Walled Structures*, 46 (1): 38–53.

- Kim, T. S.; Kuwamura, H.; Kim, S. H.; Lee, Y. T.; and Cho, T. J. 2009. Investigation on ultimate strength of thin-walled steel single shear bolted connections with two bolts using finite element analysis, *Thin-Walled Structures*, 47 (11): 1191–1202.
- Kishi, N 1994. Semi-rigid connections, in „Advanced analysis of steel frames“, edited by Chen W. F. And Toma S. CRC press, Boca Raton, FL.
- Krishnamurthy, N. 1978a. Frech look at bolted end-plate behaviour and design, *Engineering Journal*, AISC, 15 (2): 39–49.
- Krishnamurthy, N. 1978b. Analytical investigation of bolted stiffened tee-stubs, Report CE-MBMA-1902, Department of civil engineering, Vanderbilt University, Nashville, TN.
- Kvedaras, A. K.; Rasiulis, K.; Šapalas, A.; Šapalas, V.; Šaučiuvėnas, G.; Urbonas, K.; Zabulionis, D. Plieninės konstrukcijos. Vilnius: Technika 376 p.
- LaBoube, R. A.; Soko, M. A. 2002. Behavior of screw connections in residential construction, *ASCE*, 128(1): 115–118.
- Laim, L.; Rodrigues, J. P. C.; da Silva, L. S. 2013. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams, *Thin-Walled Structures* 72: 1–13.
- Landolfo, R.; Mammana, O.; Portioli, F.; Lorenzo, G. D.; Guerrieri, M. R. 2008. Laser welded built-up cold-formed steel beams: experimental investigations, *Thin-Walled Structures*, 46 (7–9): 781–791.
- Landolfo, R.; Mammana, O.; Portioli, F.; Lorenzo, G. D.; Guerrieri, M. R. 2009. Experimental investigation on laser welded connections for built-up cold-formed steel beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (1): 196–208.
- Lee, Y. H.; Tan, C. S.; Mohammad, S.; Tahir, M. M.; Shek, P. N. 2014. Review on Cold-Formed Steel Connections, *The Scientific World Journal*, 2014: 1–11.
- Lim, J. B. P.; Nethercot, D. A. 2003. Ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel members, *Thin-walled Structures* 41(11): 1019–1039.
- Lim, J. B. P.; Nethercot, D. A. 2004. Stiffness prediction for bolted momentconnections between cold-formed steel members, *Journal of Constructional Steel Research* 60(1): 85–107.
- Liu, Q; Yang, J.; Wang, F. 2015. Numerical simulation of sleeve connections for cold formed steel sigma sections, *Engineering Structures*, 100: 686–695.
- LST EN 10025-2/AC. Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 2 dalis. Nelegiruoto konstrukcinio plieno techninės tiekimo sąlygos. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2005, 8.
- LST EN 1993-1-1+AC: 2006. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2007, 102.
- LST EN 1993-1-3: 2006. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-3 dalis. Bendrosios taisyklės. Šaltai suformuotų elementų ir lakštų papildomos taisyklės. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2008, 150 p.

LST EN 1993-1-5: 2008. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-5 dalis. Lakštinių konstrukcijų elementai. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2008, 65 p.

LST EN 1993-1-8:2005+AC:2006: 2007. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2007, 134.

LST EN ISO 4017. Tvirtinimo detalės. Sraigtai su šešiabriaune galvute. A ir B klasių gaminiai (ISO 4017:2014). Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2014, 13.

LST EN ISO 4032. Šešiabriaunės normaliosios veržlės (1 tipas). A ir B klasių gaminiai (ISO 4032:2012). Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2013, 9.

LST EN ISO 6892-1. Metalai. Tempimo bandymai. 1 dalis. Bandymo kambario temperatūroje metodas (ISO 6892-1:2009). Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2009, 68.

LST EN ISO 7089. Poveržlės. Vidutinės serijos. A klasės gaminiai (ISO 7089:2000). Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2002, 8.

Lu, W.; P. Outinen, M. J.; Ma, Z. 2011. Design of screwed steel sheeting connection at ambient and elevated temperatures, *Thin-Walled Structures*, 49 (12): 1526–1533.

Maduliat, S.; Mendis, P.; Ngo, T.D. 2015. Failure modes and buckling coefficient of partially stiffened cold-formed sections in bending, *Journal of Constructional Steel Research*, 111: 21–30.

Moazed, R.; Fotouhi, R.; Szyszkowski, W. 2012. Out-of-plane behaviour and FE modelling of a T-joint connection of thin-walled square tubes, *Thin-Walled Structures*, 51: 87–98.

Moazed, R.; Szyszkowski, W.; Fotouhi, R. 2009. The in-plane behaviour and FE modeling of a T-joint connection of thinwalled square tubes, *Thin-Walled Structures*, 47 (6-7): 816–825.

Mujagic J. R. U.; Easterling, W. S. 2009. Connections in coldformed steel framing—designing with AISI, 2007 specification and application overview, *Structure Magazine*, 9–11.

Nethercot, D. A. 1985. Steel beam-to-column connections: A review of test data and its applicability to the evaluation of joint behaviour in the performance of steel frames, CI-RIA Project study.

Neto, A. H. F.; Vieira, L. C. M.; Malite, M. 2016. Strength and stiffness of cold-formed steel purlins with sleeved and overlapped bolted connections, *Thin-Walled Structures* 104: 44–53.

Neto, A. H. F.; Vieira, L. C. M.; Malite, M. 2016. Strength and stiffness of cold-formed steel purlins with sleeved and overlapped bolted connections, *Thin-Walled Structures*, 104: 44–53.

- Ozturk, F.; Pul, S. 2015. Experimental and numerical study on a full scale apex connection of cold-formed steel portal frames, *Thin-Walled Structures* 94: 79–88.
- Pernes, P. M.; Nagy, Z. 2012. FE modeling of cold-formed steel bolted joints in pitch-roof portal frames, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* 3: 234–242.
- Pham, C. H.; Davis, A. F.; Emmett, B. R. 2014. Numerical investigation of cold-formed lapped Z purlins under combined bending and shear, *Journal of Constructional Steel Research*, 95: 116–125.
- Ren, C.; Zhao, X.; Chen, Y. 2016. Buckling behaviour of partially restrained cold-formed steel zed purlins subjected to transverse distributed uplift loading, *Engineering Structures*, 114: 14–24.
- Roy, K.; Ting, T. C. H.; Lau, H. H.; Lim J. B. P. 2018. Nonlinear behaviour of back-to-back gapped built-up cold-formed steel channel sections under compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 147: 257–276.
- Sabbagh, A. B.; Petkovski, M.; Pilakoutas, K.; Mirghaderi, R. 2011. Ductile moment – resisting frames using cold – formed steel sections: an analytical investigation, *Journal of Constructional Steel Research* 67(4): 634–646.
- Sabbagh, A. B.; Petkovski, M.; Pilakoutas, K.; Mirghaderi, R. 2012a. Development of cold-formed steel elements for earthquake resistant moment frame buildings, *Thin-walled Structures* 53: 99–108.
- Sabbagh, A. B.; Petkovski, M.; Pilakoutas, K.; Mirghaderi, R. 2012b. Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings, *Engineering Structures* 42: 371–386.
- Sabbagh, A. B.; Petkovski, M.; Pilakoutas, K.; Mirghaderi, R. 2013. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip, *Journal of Constructional Steel Research* 80: 100–108.
- Safdarian, R.; Naeini, H. M. 2015. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section, *Thin-Walled Structures*, 92: 130–136.
- Serrette, R.; Peyton, D. 2009. Strength of screw connections in cold-formed steel construction, *Journal of Structural Engineering*, 135 (8): 951–958.
- Silva Luis Simoes; Simoes Rui; Gervasio Helena 2016. Design of steel structures 2nd Edition, Portugal: Multicomp Lda, 493 p.
- Singh, T. G.; Singh, K. D. 2018. Experimental investigation on performance of perforated cold-formed steel tubular stub columns, *Thin-Walled Structures*, 131: 107–121.
- Slocum, A. 1992. Precision Machine Design, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- Tahir, M. M.; Hamid, H. A.; Tan, C. S.; Mahendran, M. 2011. Structural behavior of screwed beam-to-column moment connections with cold-formed steel members, *Proceedings of the 6th International Symposium on Steel Structures*: 503–510.

- Tan S. H. 2001. Channel frames with semi-rigid joints, *Computers & Structures* 79(7): 715–725.
- Tan, C. S.; Lee, Y. H.; Lee, Y. L.; Mohammad, S.; Sulaiman, A.; Tahir, M. M.; Shek, P. N. 2013. Numerical simulation of cold-formed steel top-seat flange cleat connection, *Jurnal Teknologi* 3: 63–71.
- Uang, C. M.; Hong, J. K.; Sato, A.; Wood, K. 2010. Cold-formed steel special bolted moment frames: cyclic testing and numerical modeling of moment connections, *Journal of Structural Engineering* 8.
- Urbonas, K. 2006. Plieninių rėminių konstrukcijų pasiduodančių mazgų modeliavimo ir projektavimo metodų kūrimas. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 113 p.
- Wang, C.; Mynors, D.; Morgan, T.; Cartwright, B. 2012. Deflection analysis of sleeve jointed purlin systems with non-linear rotational stiffness, *Appl.Mech.Mater.* 147:66–69.
- Weinand, K. 1992. SERICON: Databank on joints in building frames, 1st COST C1 Workshop, Strasbourg, October 28–30.
- Wong, M. F.; Chung, K. F. 2002. Structural behaviour of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames, *Journal of Constructional Steel Research* 58(2): 253–274.
- Yang, J.; Liu, Q. 2012. Sleeve connections of cold-formed steel sigma purlins, *Engineering Structures* 43: 245–258.
- Ye, J.; Wang, X.; Zhao, M. 2016. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing, *Journal of Constructional Steel Research* 121: 1–12.
- Yee, K. L. ir Melchers, R. E. 1986. Moment-rotation curves for bolted connections, *Journal of structural engineering*, ASCE, 112: 615–635.
- Yu, W. K.; Chung, K. F.; Wong, M. F. 2005. Analysis of bolted moment connections in cold – formed steel beam-column sub-frames, *Journal of Constructional Steel Research* 61(9): 1332–1352.
- Yu, W.W. 2000. Cold-Formed Steel Design. 3rd edition. John Wiley and Sons Inc. ISBN 0-471-34809-0.
- Zaharia, R.; Dubina, D. 2006. Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses, *Journal of Constructional Steel Research* 62(3): 240–249.
- Zhang, L.; Tong, G. 2008. Moment resistance and flexural rigidity of lapped connections in multi-span cold-formed Z purlin systems, *Thin-Walled Structures*, 46 (5): 551–560.
- Zhang, J.- H.; Young B. 2018. Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners, *Journal of Constructional Steel Research* 147: 380–392.
- Zhao, X. L.; Hancock, G. J. 1991. T-joints in rectangular hollow sections subject to combined actions, *Journal of Structural Engineering*, 117 (8): 2258–2277.

Zhao, X. L.; Hancock, G. J. 1995a. Butt welds and transverse fillet welds in thin cold-formed RHS members, *Journal of Structural Engineering*, 121 (11):1674–1682.

Zhao, X. L.; Hancock, G. J. 1995b. Longitudinal fillet welds in thin cold-formed RHS members, *Journal of Structural Engineering*, 121 (11): 1683–1690.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Bučmys, Ž.; Daniūnas, A.; Jaspart J-P.; Demonceau J-F. 2018. A component method for cold-formed steel beam-to-column bolted gusset plate joints, *Thin-Walled Structures*, 123: 520–527. (Clarivate Analytics Web of Science)

Bučmys, Ž.; Daniūnas, A. 2017a. Rectangular gusset plate behaviour in cold-formed I-type steel connections, *Archives of Civil Engineering*, 63 (2): 3–21. (Clarivate Analytics Web of Science)

Bučmys Ž.; Daniūnas A. 2015b. Analytical and experimental investigation of cold-formed steel beam-to-column bolted gusset-plate joints. *Journal of civil engineering and management*, 21 (8): 1061–1069. (Clarivate Analytics Web of Science)

Bučmys, Ž.; Šaučiuvėnas, G. 2013. The behavior of cold formed steel structure connections, *Engineering Structures and Technologies*, 5:3, 113–122.

Bučmys, Ž.; Dališanskis, R. 2012. Pusiau standžių plieninių rėmų pėdų modeliavimas, standžio ir stiprio nustatymas. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Statyba, transportas, aviacinės technologijos = Civil and transport engineering, aviation technologies*, Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 4, nr. 4 (2012), p. 300–305.

Straipsniai kituose leidiniuose

Bučmys Ž.; Daniūnas A. 2017b. Component method in the strength evaluation of cold-formed steel joints. *Procedia Engineering. Modern Building Materials, Structures and Techniques*, MBMST 2016. 172 (2017): 143–148.

Bučmys, Ž. 2013. Plieninių plonasienių pusiau pasiduodančių mazgų skaitinis modeliavimas. *16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2013 metų teminė konferencija „Statyba“*, 2013 m. kovo 20–22 d. Vilnius: Technika. ISSN 2029-7149.

Bučmys, Ž.; Daniūnas, A. 2015a. Investigation of cold formed steel beam to column bolted gusset plate connections. *Proceedings of The 13th Nordic Steel Construction Conference (NSCC-2015)*, 23-25 September, 2015, Tampere, Finland. Tampere: Tampere university of technology, 2015. p. 245–246.

Bučmys, Ž.; Daniūnas, A.; Rasiulis, K. 2014. Investigation of cold formed steel connections: experimental and numerical analysis of beam to column gusset plate connections. *EUROSTEEL 2014: 7th European conference on steel and composite structures*, September 10-12, 2014, Naples, Italy. Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2014. p. 417–418.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

From last decade of the last century, we can see the growing trend of applying cold-formed steel structures because they are lightweight, quick and simple to erect, resistant to corrosion and easy to transport. Cold-formed steel structures are used in living houses, industrial and engineering structures as roof purlins, truss elements and wall purlins. These structures are also used for warehouses and living house portal frames. Cold-formed steel structures are mostly connected by using bolts and clinching but rarely welding. Cold-formed steel structures can have various types of cross sections (L, U, C, Z, Sigma and Omega) with the thickness of walls varying from 0.8 to 3.0 mm and height – from 50 to 350 mm. Cold-formed steel structures usually are made out of higher class steel (350 MPa and higher) and are made by using cold bending method of thin sheets which are covered with thin layer of anticorrosion material (usually zinc).

Design technique of both elements and joint strength and rotational stiffness calculation of cold-formed steel structures are still developing since these structures are being used relatively recently. At the moment in Lithuania there is no valid structural design rules how to evaluate rotational stiffness of joints of cold-formed steel structures and the complete technique for strength calculation of all the components is not yet submitted.

There are some laboratory investigation and finite element modelling test results of beam-to-column joints of cold-formed steel structures presented in literature. Although there is lack of these investigations they show that joint behaviour of cold-formed steel

structures is not pinned or rigid but the behaviour is semi-rigid. Many factors depend on the joint rotational stiffness: bending moment distribution in columns and beams, sensitivity to second order effects, strength and stability of the structure and it shows that it is important to investigate and analyze the behaviour of these structures.

Relevance of the thesis

Rotational stiffness of the joint has an impact to strength and stability of the structure. Wrong evaluation of joint rotational stiffness leads to wrong evaluation of column buckling length, bending moment distribution in beams and columns, deflection of beams and deflection of the whole structure. Beam-to-column joint is very common and one of the most important structures in the whole building. At the moment in Lithuania there is no valid structural design rule how to evaluate joint rotational stiffness of cold-formed steel structures and as a result in structure design practice these joints are idealized and their real rotational stiffness is not evaluated. Bolted with gusset plate joint is investigated in this thesis because these joints are very widely used for the simple and practical installation. As a result, new investigation of cold-formed steel structure joints behaviour and new design technique for rotational stiffness and bending moment resistance is needed.

The object of the research

The object of the research is to investigate cold-formed steel structure beam-to-column joint behaviour under statical load.

The aim of the thesis

The aim of the research is to suggest component method for both beam-to-column joint rotational stiffness and bending moment resistance calculation of cold-formed steel structures.

The tasks of the thesis

The following tasks were raised to achieve the aim of the thesis:

1. To review models and methods of cold-formed steel structure joint rotational stiffness and the resistance of bending moment evaluation. To identify their advantages and disadvantages.
2. To suggest joint mechanical model and method of strength and stiffness evaluation of every each component.
3. To execute laboratory investigation and finite element modelling tests of cold-formed steel structure joints under statical load and to investigate bending moment resistance and rotational stiffness values and failure modes of the specimens.
4. To investigate behaviour of T and rectangular form gusset plate in plane.
5. To check component method accuracy with laboratory investigation and finite element modelling test results.

The research methodology

The following research methods were used in the work: laboratory investigation, finite element modelling and the component method. Three spring mechanical model is suggested which is suitable for cold-formed steel structure beam-to-column joint rotational stiffness and bending moment resistance evaluation. Bending moment and rotation relationship of eight specimens have been investigated using laboratory investigation, finite element modelling and the component method.

Scientific novelty of the thesis

Scientific novelty of the work is represented by the following new results:

1. It was suggested to analyze a cold-formed structure beam-to-column joint as three separate rotational springs. A three spring mechanical model which is suitable for cold-formed steel structure beam-to-column rotational stiffness and bending moment resistance evaluation, was suggested.
2. A component method for the design of cold-formed steel joints is expanded with new component gusset plate bending moment resistance and rotational stiffness expressions. A suggested method allows to evaluate bending moment resistance and rotational stiffness of beam-to-column joint theoretically.
3. T and rectangular type gusset plates were applied to beam-to-column joints.
4. The method of bending moment and rotation relationship evaluation of beam-to-column joint and its separate parts under statical load using laboratory investigation was presented.
5. The method of bending moment and rotation relationship evaluation of beam-to-column joint and its separate parts under statical load using finite element modelling was presented.

Practical value of the research findings

New results were achieved for civil engineering science – component method was expanded for rotational stiffness and strength calculation of bolted joints of cold-formed steel elements. Suggested component method is suitable for the practical design of structures. Designing norms Eurocodes (which are not suitable for cold-formed steel joint rotational stiffness evaluation) can be extended by using both the suggested technique of three spring model and separate gusset plate component. Real joint behaviour can be evaluated to whole structure performance by using bending moment and rotation relationship curves calculated by suggested component method. It is possible to evaluate precisely the distribution of bending moment in structure elements by knowing the real behaviour of the joints.

Defended statements

1. The component method can be used for cold-formed steel structure joint rotational stiffness and bending moment resistance calculation which allows to

theoretically evaluate the relationship between bending moment and rotation that is used for analyzing and designing structures.

2. Suggested three spring model allows to evaluate cold-formed steel joint rotational stiffness and bending moment resistance.
3. Ordinary component method can be expanded with expressions of gusset plate component rotational stiffness and bending moment resistance evaluation.
4. Suggested finite element model that allows evaluating beam to column joint and its separate parts rotational stiffness and bending moment resistance.

Approval of the research findings

Five articles focusing on the subject of the discussed dissertation have been published: two article - in the Clarivate Analytics Web of Science register with citation index (Bučmys *et al.* 2018, Bučmys ir Daniūnas 2015), one article - in the Clarivate Analytics Web of Science register without citation index (Bučmys ir Daniūnas 2017a) and two in international database (Bučmys ir Šaučiuvėnas 2013, Bučmys ir Dališanskis 2012).

The results of research performed in the dissertation were presented in four scientific conferences:

- 12th international conference *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*, Vilnius, Lietuva 2016;
- 13th international conference *The 13th Nordic Steel Construction Conference*, Tampere, Finland, 2015;
- 7th international conference Eurosteel 2014: *7th European conference on steel and composite structures*, Naples, Italy, 2014;
- 16th Conference of Young Scientists *Science-Lithuanian future*, Vilnius, Lietuva, 2013.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, 3 chapters, general conclusions, a reference list, a list of publications by the author, and 2 annexes. The volume of this dissertation is 111 pages, 71 figures, 13 tables and 2 annexes. 120 references have been used.

1. Review of cold-formed steel element semi-rigid joint investigation

Nowadays lightweight cold-formed steel structures are widely used in construction sites. Earlier cold-formed steel structures have been used only as roof or wall purlins for sandwich panels. There has been a growing trend to investigate cold-formed steel structures behaviour (Ren *et al.* 2016, Gunalan *et al.* 2015, Anbarasu 2016, Roy *et al.* 2018, Singh ir Singh 2018, Gilio *et al.* 2018, Zhang ir Young 2018, Fratamico *et al.* 2018) and develop calculation methods that evaluate local (LST EN 1993-1-5 (2008)), distortional (LST EN 1993-1-3 (2008)) and global buckling (LST EN 1993-1-1 (2007)) during the last 20 years.

As a result, it has enlarged the opportunities to use cold-formed steel structures as load bearing structures such as lightweight frames and trusses.

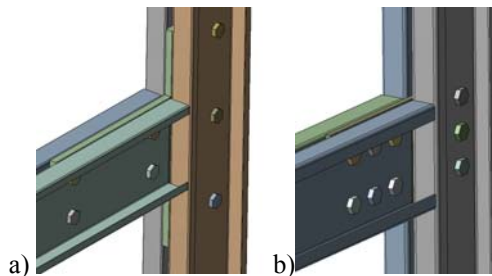


Fig. S1.1. Cold-formed steel joint under analysis with a) T form gusset plate and b) rectangular form gusset plate

According to Eurocode (LST EN 1993-1-1) steel elements are divided to classes by the ratio between the width of the cross-section part and the thickness of the wall. The first class consists of elements where plastic hinge can occur and rotation capacity is unlimited. The second class contains the elements where plastic hinge can occur but rotation capacity is limited. Plastic analysis is suitable for elements with the first and the second class. The elements where yield stress can occur in the most farthest part of the section but local buckling limits the appearance of plastic hinge form the third class. Finally, the forth class consists of the elements where local buckling limits appearance of reaching yield stress in one or more parts of the cross-section. For this reason, the elements of the forth class can be analyzed only in elastic stage and must be used effective cross-section method. Cold-formed steel elements due to thin walls usually belong to the forth class.

Gusset plates and bolts (Fig. S1.1) are often used for the beam to column joints because of simplicity and fast installation. Investigation of such joints confirms that behaviour is semi-rigid (Dubina ir Ungureanu 2010, Dubina 2008) and further analysis is essential.

Structures are usually designed by accepting idealized pinned or rigid behaviour of joints. For this reason, the design process is more simple but it does not reflect the real behaviour of structures. Laboratory investigations (Goverdan 1983, Nethercot 1985, Chen ir Kishi 1986, Weinand 1992) show that the joints that are treated as pinned have small amount of bending moment and the joints that are treated as rigid have small amount of rotation. Behaviour of joints have huge impact on the distribution of the bending moment in beams and columns of the whole structure and sensitivity to second order effects. For this reason, it is very important to estimate real joint rotational stiffness when analyzing structures. Estimation of real joint rotational stiffness leads to more economic designing of structures (Anderson *et al.* 1995, Faella *et al.* 1996b, 1997).

The design codes (EC 1993-1-8 (2007)) that are valid in Lithuania present rotational stiffness calculation method only for hot rolled elements. In addition, design rules are valid for elements, where the cross-section of walls is not thinner than 4 mm. Cold-formed element design codes (EC 1993-1-3 (2008) ir EC 1993-1-5 (2008)) suggest no practical

method of joint rotational stiffness calculation. To sum up there is no component method for cold-formed steel gusset plate bolted joint both rotational stiffness and bending moment resistance calculation presented in currently valid design rules and science papers. Thus, this is a very necessary method for such joints to be evaluated on rotational stiffness and bending moment resistance.

2. Theoretical investigation and component method modelling

The mechanical model uses the component method and separates the joint into three separate rotational springs (Fig. S2.1): beam bolt group, column bolt group and gusset plate.

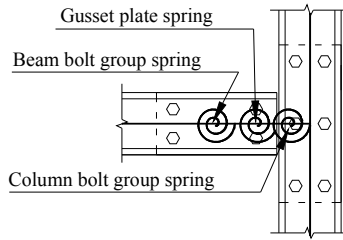


Fig. S2.1. Three spring model of semi-rigid bolted connection

The bending moment resistance $M_{j,Rd}$ of the presented beam-to-column joint depends on bending moment resistance of these springs:

- Beam bolt group $M_{bbg,Rd}$;
- Column bolt group $M_{cbg,Rd}$;
- Gusset plate $M_{gp,Rd}$.

The bending moment resistance depends on the weakest spring of the joint:

$$M_{j,Rd} = \min(M_{bbg,Rd}; M_{cbg,Rd}; M_{gp,Rd}). \quad (S2.1)$$

Bolt group bending moment resistance depends of the weakest component of the bolt group. Strength of the components is determined according to the equations presented in Eurocode 3. The bending moment resistance $M_{bbg,Rd}$, and $M_{cbg,Rd}$, of the bolt groups depends on strength of active components:

- Section web in bearing $F_{bcf,Rd}$;
- Gusset plate in bearing $F_{bgp,Rd}$;
- Bolts in shear $F_{v,Rd}$.

Bolt resistance force could be calculated as the strength of the weakest component:

$$F_{Rd} = \min(F_{bcf,Rd}; F_{bgp,Rd}; F_{v,Rd}). \quad (S2.2)$$

The strength of each component is explained in detail in this doctoral thesis.

The bending moment resistance of beam bolt group and column bolt group could be calculated using a well-known classical equation:

$$M_{bbg,Rd} = \sum_{r=1}^n h_r \cdot F_{Rd}, \quad (S2.3)$$

$$M_{cbg,Rd} = \sum_{r=1}^n h_r \cdot F_{Rd}, \quad (S2.4)$$

where F_{Rd} – effective design resistance of single bolt r , h_r – distance from the bolt r to the centre of rotation, r – bolt number, n – total number of bolts.

The bending moment resistance of gusset plate was calculated assuming that the joint deforms only in plane and maximum stresses in all failure section would reach yield stresses. The design moment resistance of gusset plate could be calculated according well known classical equation:

$$M_{gp,Rd} = \sigma_y \cdot W_{pl}, \quad (S2.5)$$

where σ_y – yield strength of steel, W_{pl} – plastic moment of the weakest section which is explained in detail in this doctoral thesis.

The mechanical model that allows integrating every single bolt extensional stiffness into a bolt group rotational stiffness is depicted in Fig. S2.2. The initial rotational stiffness of the beam and column bolt groups can be expressed as:

$$S_{bbg,ini} = \frac{M_1}{\varphi_{bbg}} = \frac{E \cdot z_{b1}^2}{\frac{1}{k_{b1}}} + \dots + \frac{E \cdot z_{bn}^2}{\frac{1}{k_{bn}}}, \quad (S2.6)$$

$$S_{cbg,ini} = \frac{M}{\varphi_{cbg}} = \frac{E \cdot z_{b1}^2}{\frac{1}{k_{b1}}} + \dots + \frac{E \cdot z_{bn}^2}{\frac{1}{k_{bn}}}, \quad (S2.7)$$

where M_1 – bending moment of beam bolt group, M – bending moment of column bolt group, φ_{bbg} – rotation of beam bolt group, φ_{cbg} – rotation of column bolt group, E – the Young modulus, z_{b1} , z_{bn} – distances between first and n pair of bolts, k_{b1} , k_{bn} – the stiffness coefficient of a single bolt.

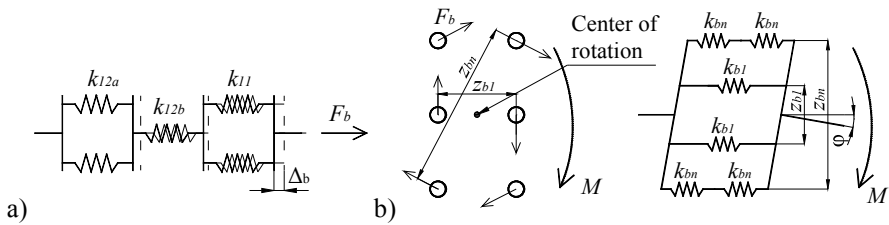


Fig. S2.2. Mechanical models: a) one bolt spring mechanical model: k_{12a} – cold-formed steel element wall in bearing, k_{12b} – gusset plate in bearing, k_{11} – bolt in shear; b) mechanical model of bolt group spring: F_b – force in bolt, z_{b1} – distance between 1st bolt row, z_{bn} – distance between n th bolt row, M – bending moment in bolt group, k_{b1} – stiffness coefficient of bolt in first row, k_{bn} – stiffness coefficient of bolt in n th row

In EC 1993-1-8 (2007), there is no suggestion for the rotational stiffness calculation of a gusset plate. The rotation of the gusset plate φ_{gp} has therefore been modelled as a sum of separate outstand element rotations φ_1 , φ_2 , φ_3 due to shear force V , bending moments M_1 and M (Fig. S2.3 a). As a result, the initial rotational stiffness of a T form gusset plate was calculated according to this equation:

$$S_{gp,ini} = \frac{M}{\varphi_{gp}} = \frac{M}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3} = \frac{M}{\frac{M_1 \cdot L_a}{E \cdot I_1} + \frac{V \cdot L_a^2}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{L_b^2 \cdot M}{2 \cdot L_c \cdot E \cdot I_2}} = \frac{M}{\frac{2 \cdot M_1 \cdot L_a + V \cdot L_a^2}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{L_b^2 \cdot M}{2 \cdot L_c \cdot E \cdot I_2}}, \quad (S2.8)$$

where L_a – distance from the rotation centre of the beam bolt group to the edge of gusset plate, L_b – distance from the outer bolt centre of the column bolt group to the edge of gusset plate, L_c – distance between outer bolts of the column bolt group, I_1 – the moment of inertia of the beam outstand element, I_2 – the moment of inertia of the column outstand element, V – shear force due to the beam load, M_1 and M – bending moments of beam bolt group and column bolt group, respectively.

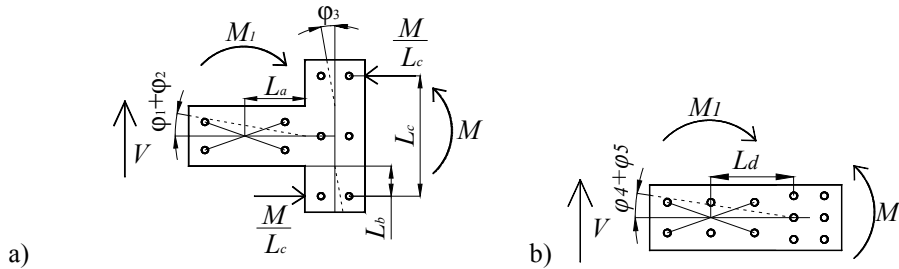


Fig. S2.3. Rotational scheme and marking of a) T form gusset plate;
b) rectangular form gusset plate

The rotation of the rectangular gusset plate was investigated as the sum of deformations occurring at the bending moment and shear forces transmitted from the beam bolt group (Fig. S2.3 b). As a result, rectangular gusset plate rotation could be separated into 1 and 2 in result from the bending moment and shear force, respectively. In this paper, the initial rotational stiffness of a gusset plate was calculated according to the equation:

$$S_{gp,ini} = \frac{M}{\varphi} = \frac{M}{\varphi_4 + \varphi_5} = \frac{M}{\frac{M_1 \cdot L_d}{E \cdot I_1} + \frac{V \cdot L_d^2}{2 \cdot E \cdot I_1}} = \frac{M}{\frac{2 \cdot M_1 \cdot L_d + V \cdot L_d^2}{2 \cdot E \cdot I_1}}, \quad (S2.9)$$

where L_d – distance from the rotation center of the beam bolt group to the nearest row of bolts of the column bolt, I_1 – second moment of area, V – shear force, M_1 – bending moment in the center of the beam bolt group, M – bending moment in the center of the column bolt group.

As a result, the overall initial stiffness of the joint was calculated assembling the initial rotational stiffness of each spring (Fig. S2.4 a) using the equation below:

$$S_{j,ini} = \frac{1}{\frac{1}{S_{gp,ini}} + \frac{1}{S_{bbg,ini}} + \frac{1}{S_{cbg,ini}}}, \quad (S2.10)$$

where $S_{gp,ini}$ – the initial rotational stiffness of gusset plate, $S_{bbg,ini}$ – the initial rotational stiffness of beam bolt group, $S_{cbg,ini}$ – the initial rotational stiffness of column bolt group.

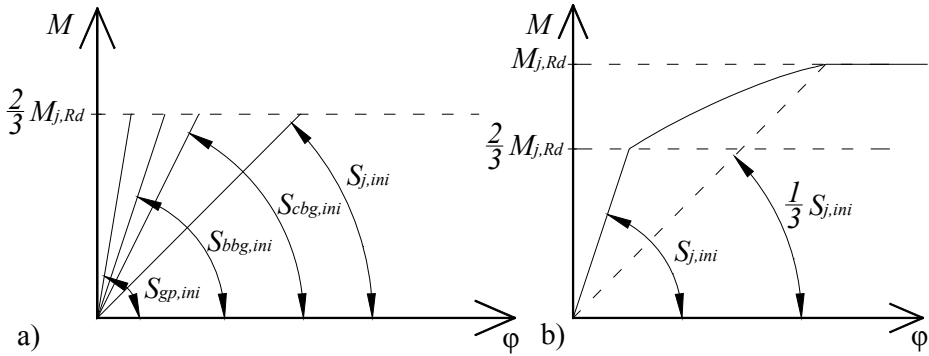


Fig. S2.4. Joint M/ϕ curves a) three-linear curve b) linear curve

The M/ϕ curve of springs and joints are depicted according to EC 1993-1-8 (2007) formulae (Fig. S2.4 b). First slope of the graph corresponds to the linear behavior which is valid provided that the bending moment M is less than $2/3 M_{j,Rd}$ where $M_{j,Rd}$ is the bending moment resistance of the joint. The second slope is arc and the third slope is taken with a stiffness equal to zero. The third slope could only be reached if failure mode is gusset plate due to bending moment or C-section web due to bearing. Otherwise in case then the failure mode are bolts in shear or local buckling of cold-formed sections the second and third slopes could be neglected.

3. Experimental investigation and comparison with theoretical results

Eight specimens have been investigated using laboratory tests (Fig. S3.1 a). Gusset plates and cold-formed C-sections were made of steel grades S355 and S350GD+Z275, respectively. The specimens were connected using 8.8 class and M12 or M16 diameter bolts. The diameter of bolt holes was 1 mm higher than the bolt diameter. The spacing between bolts connecting the beam channel and the column channel to the gusset plate differed 70–150 mm vertically and 70–200 mm horizontally. The specimens differed by bolts, gusset plate and cold-formed C-section elements (table S3.1).

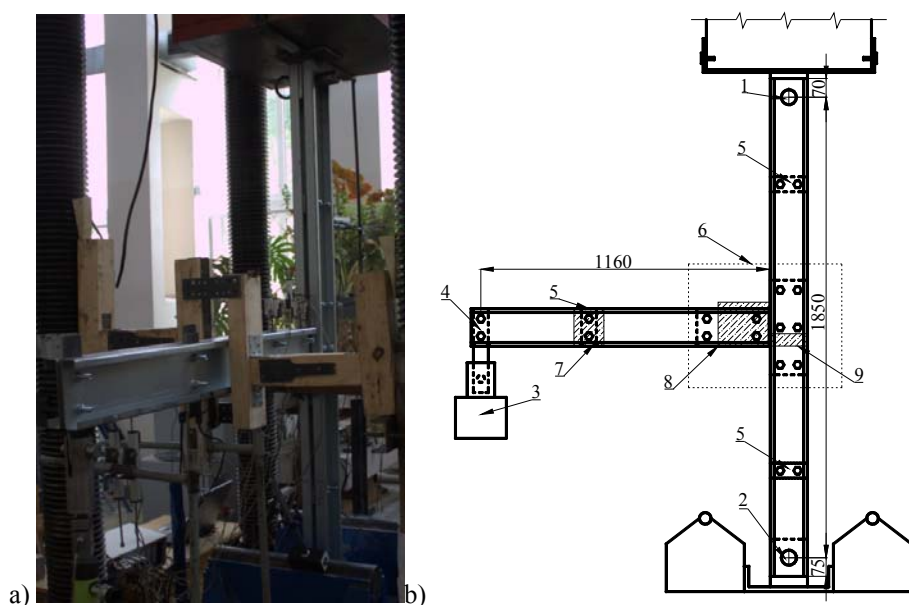


Fig. S3.1. General view of joint laboratory investigation a) and scheme b): 1 – pinned connection of the top of the column; 2 – rolling support of the bottom of the column; 3 – jack screw; 4 – load additive point; 5 – gaskets between elements; 6 – joint region; 7 – lateral restraint for beam; 8 – lateral restraint for gusset plate; 9 – lateral restraint for column

Table S3.1. Bolt diameter, gusset plate form and thickness of specimens

Specimen	Bolt diameter	Gusset plate form	Gusset plate thickness	C-section thickness
M12C15015T12	12	T	12	1.5
M12C15025T12	12	T	12	2.5
M16C15015T12	16	T	12	1.5
M16C15025T8	16	T	8	2.5
M16C15025T6	16	T	6	2.5
M12C15025T6	12	T	6	2.5
M12C15025I10	12	Rectangular	10	2.5
M12C15025I8	12	Rectangular	8	2.5

Failure mode of the first three specimens was local buckling of cold-formed elements (S3.2 a). Failure mode of other four specimens was yielding of gusset plate (S3.2 b). The failure mode of last two specimens with rectangular gusset plate was bearing of cold-formed elements (S3.2 c).

The load was transferred by the jackscrew to the end of the beam. Pinned support was used at the top of the column and roller support at the bottom of the column. All the specimens were equipped with beam and column lateral restraints (Fig. S3.1 b) to prevent lateral torsional buckling phenomena. A small part of the upper corner of beam was cut off to avoid the contact with the column flange during rotational deformations. Transducers were added to measure the deflection of beam end and rotation of the beam bolt group, column bolt group and gusset plate. Rotation due to slipping (which appear randomly depending on the initial position of the bolts in the holes) was eliminated for easier comparison with proposed mechanical models. The technique on how to convert transducers data measurements into rotation are in detail in this doctoral thesis.

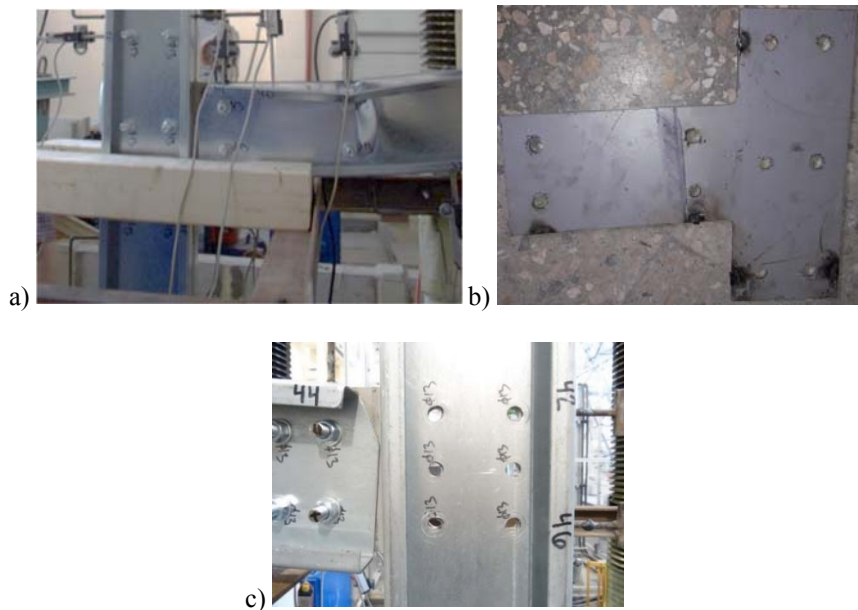


Fig. S3.2. Laboratory investigation failure modes of the specimens: a) local buckling of cold-formed elements; b) yielding of gusset plate; c) bearing of cold-formed elements

After the joint laboratory investigation, the yield strength and the ultimate strength of both steel grades were measured by the coupon tests. The coupon test data was used for the finite element modelling.

The numerical simulations were performed using Ansys Workbench software. The rotational stiffness and bending moment resistance of the connection were investigated. Cold-formed steel elements and gusset plate were modelled using SOLSH190 finite elements. It is hybrid 3-D finite elements (defined by 8 nodes and having three degrees of freedom per node: translations in the nodal x, y, and z directions.), but defined according to Mindlin plate theory (Benerjee *et al.* 2011, Barauskas *et al.* 2001, Atkočiūnas ir Nagevičius 2004). Bolts were modelled using SOLID186 finite elements (The element is

defined by 20 nodes having three degrees of freedom per node: translations in the nodal x , y , and z directions). Both elements integrated plasticity and large deflections.

Material non-linearity in the specimens was modelled with von Mises yield criterion and isotropic hardening. The stress strain relationship of cold-formed steel elements was described by a gradual yielding behaviour followed by a considerable period of strain hardening, whereas an elastic-plastic behaviour with strain hardening modulus less than 0.5% of elastic modulus E was assumed for the bolts and gusset plate. Stress – strain curves were taken from the coupon tests for cold-formed steel sections and gusset plate. Bolts were modelled using characteristic material properties. The initial slope of cold-formed steel stress-strain curve was taken as the elastic modulus, E , of the material. Yielding of the steel was defined with 0.2% strain. The third slope was taken as less than 0.5% of elastic modulus E (Laim *et al.* 2013).

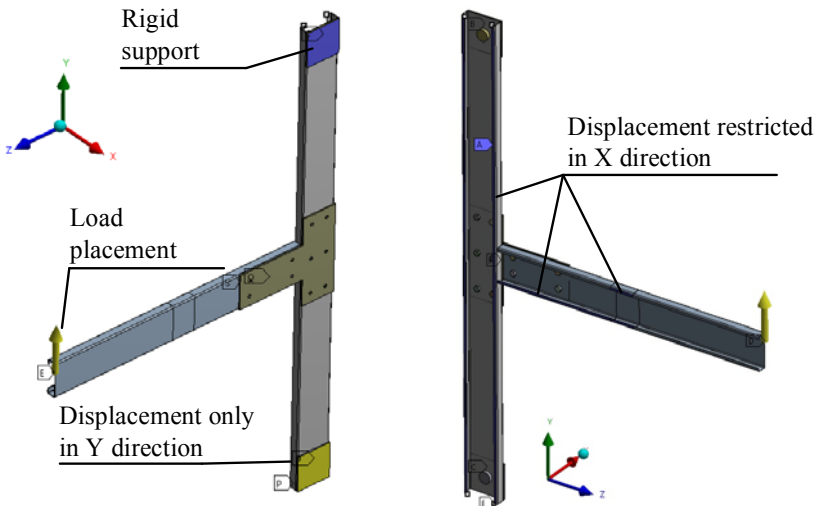


Fig. S3.3. Boundary conditions of finite element model

The cold-formed elements, gusset plate and bolts, supports and loading were simulated according to laboratory tests using a three-dimensional numerical model (Fig. S3.3). Concentrated force was applied at the end of the beam, as in the real tests. Pinned connection was modelled on the top of the column and roller support was modelled at the bottom of the column. To save time only half of the specimen was modelled using symmetry conditions in Y - Z plane. Finally, the translations in X direction were constrained in order to prevent lateral deformations. The contact between cold-formed elements and gusset plate was modelled as “no penetration”. It is contact condition then finite elements cannot penetrate each other and friction coefficient is 0. As in the laboratory tests the bolt hole diameter was modelled 1 mm higher than bolt one. It is worth mentioning that rotation due to slipping was eliminated as in laboratory test results.

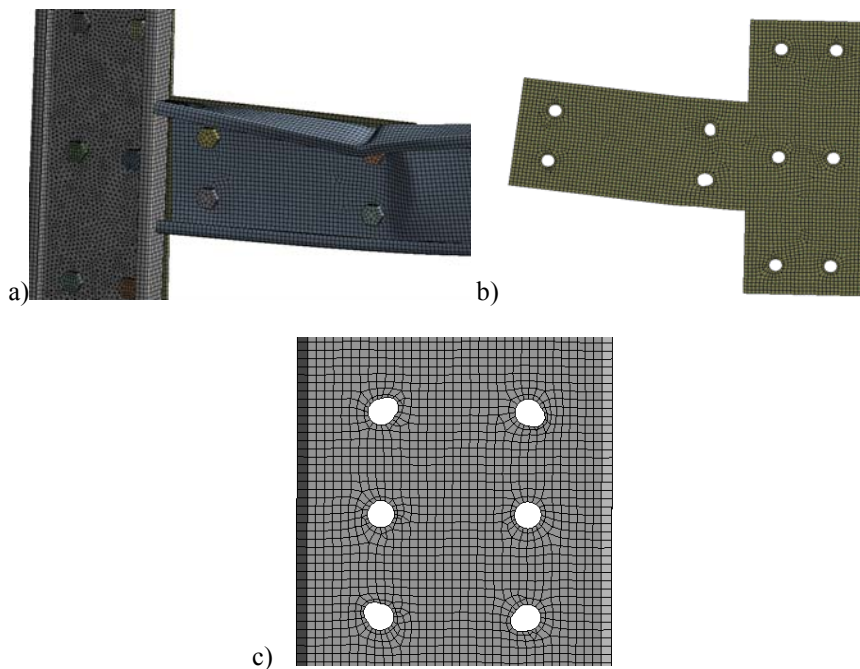


Fig. S3.4. Finite element investigation failure modes of the specimens:
a) Local buckling of cold-formed elements; b) Yielding of gusset plate;
c) bearing of cold-formed elements

Table S3.2. Joint initial rotational stiffness and bending moment resistance values calculated using laboratory investigation, finite element modelling and component method

Specimen	$M_{j,R,exp}$, kNm	$M_{j,R,bem}$, kNm	$M_{j,R,komp}$, kNm	$S_{j,ini,exp}$, kNm/rad	$S_{j,ini,bem}$, kNm/rad	$S_{j,ini,komp}$, kNm/rad
M12C15015T12	12.62	11.73	11.95	—	523.40	471.22
M12C15025T12	24.95	22.37	24.38	—	568.44	535.79
M16C15015T12	13.17	11.78	11.95	—	636.60	626.89
M16C15025T8	17.16	16.81	14.36	665.63	645.81	664.02
M16C15025T6	11.39	12.84	10.78	540.48	577.33	571.54
M12C15025T6	12.34	10.37	10.78	364.28	403.66	343.64
M12C15025I8	17.38	18.91	15.29	131.70	140.90	149.59
M12C15025I10	17.22	16.30	15.98	139.43	146.60	152.80

All the specimens that have been investigated in the laboratory were modelled using finite element method. All the specimens had the same failure modes as in the laboratory investigation (Fig. S3.4): local buckling of cold-formed elements, yielding of gusset plate and bearing of cold-formed elements.

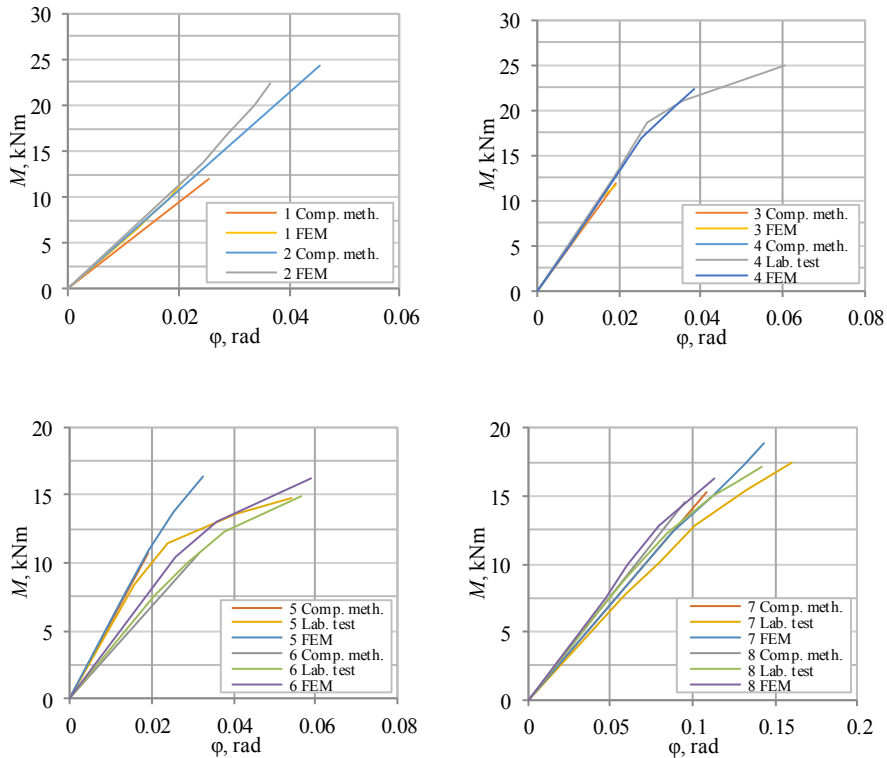


Fig. S3.5. Joint M/ϕ curves using laboratory investigation, finite element modelling and component method: 1 – M12C15015T12; 2 – M12C15025T12; 3 – M16C15015T12; 4 – M16C15025T8; 5 – M16C15025T6; 6 – M12C15025T6; 7 – M12C15025I8; 8 – M12C15025I10

Joint M/ϕ curves are depicted in Fig. S3.5 and initial rotational stiffness values are depicted in Table S3.2. M12C15015T12, M12C15025T12, M16C15015T12, M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 specimens initial rotational stiffness calculated using component method differed from finite element method by 10.0%, 5.7%, 1.5%, 2.7%, 1.0%, 14.9%, 5.8%, 4.1%, but M16C15025T8, M16C15025T6, M12C15025T6, M12C15025I8, M12C15025I10 specimens component method initial rotational stiffness values differed from laboratory investigation values by 0.2%, 5.4%, 5.7%, 12.0%, 8.8%. Experimental M/ϕ curves of the first three specimens with failure mode of local buckling of cold-formed elements (with

12 mm thickness T form gusset plates) are close to linear which show good agreement with component method linear model. The next three specimens with failure mode of yielding of gusset plate (with 8 and 6 mm thickness T form gusset plates) experimental M/φ curves show significant rotational stiffness decrease. Component method M/φ curve is linear because bending moment resistance calculated using component method is lower than the decrease of experimental rotational stiffness. Experimental M/φ curves of the last two specimens with failure mode of bearing of cold-formed elements (with I form gusset plates) also show significant rotational stiffness decrease. Component method M/φ curve is linear because bending moment resistance calculated using component method is lower than the decrease of experimental rotational stiffness.

Joint failure modes calculated using component method were same comparing with laboratory test data. Laboratory bending moment resistance was up to 16.3% higher than component method.

General conclusions

1. Review of cold-formed element joint design methods in science literature showed that there no suggested component method for rotational stiffness and bending moment resistance calculation for all the types of bolted joints. At the moment there is no method of bending moment resistance and rotational stiffness and bending moment resistance calculation in design norms Eurocodes.
2. Three spring component model, which is suitable for cold-formed steel element joint rotational stiffness calculation was suggested. Suggested component model analyses joint as rotation of separate three springs – beam and column bolt groups and gusset plate. The method has been completed with rotational stiffness and bending moment resistance formulas for gusset plate.
3. Experimental investigation demonstrated, that proposed method for gusset plate bending moment resistance $M_{gp,Rd}$ calculation using component method is suitable when vertical bolt column consists of two or three bolts.
4. Experimental investigation proved that suggested different M/φ curves should be used for component method – linear model should be used when failure modes are shear of bolts, bearing of cold-formed steel elements and gusset plate, three-linear model should be used then failure mode are yielding of gusset plate.
5. Finite element model behaviour shows a good agreement with laboratory tests. Investigation shows that finite element model is suitable to perform both abrupt failure mode as local buckling of cold-formed steel elements and elastic-plastic failure mode as yielding of gusset plate or bearing of cold-formed steel elements. It shows that finite element model is suitable for verification of theoretical models.
6. Component method can be used for failure mode prediction – laboratory tests and finite element modelling confirmed component method results.

7. Laboratory investigation and finite element modelling showed that using lateral restraints plastic hinge occurs in gusset plate and it increases gusset plate bending moment resistance capacity. It confirms presented bending moment resistance calculation method, which takes into account steel yielding through all the gusset plate section.
8. Comparing calculations using component method with laboratory investigation results bending moment resistance capacity is lower from 2.3% to 16.3%. Comparing finite element modelling result data with component method bending moment resistance capacity four specimens is higher from 1.4% to 8.2%, and four specimens is lower from 2.0% to 19.1%. Joint laboratory initial rotational stiffness of two specimens is higher than calculated using component method from 0.2% to 5.7%, and three specimens laboratory initial rotational stiffness is lower than calculated using component method from 5.4% to 12.0%.

Priedai³

A priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Žilvinas BUČMYS

PLIENINIŲ ŠALTAI LANKSTYTŲ ELEMENTŲ
VARŽTINIŲ MAZGŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

INVESTIGATION OF BOLTED JOINTS OF
COLD-FORMED STEEL ELEMENTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2019 04 12. 11,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius